



**Universidade Estadual de Campinas**  
**Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação**  
**Departamento de Sistemas de Energia Elétrica**

**Lógica Nebulosa e Técnica de Otimização Particle Swarm**  
**Aplicadas ao Controle de Tensão e de Potência Reativa**

Autora: Ana Carolina Garcia Canôas

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto F. Murari

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

**Banca Examinadora**

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari	UNICAMP
Prof. Dr. Marcus Theodor Schilling	UFF
Prof. Dr. Mário Oleskovicz	EESC / USP
Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva	UNICAMP
Prof. Dr. Walmir de Freitas Filho	UNICAMP

Campinas, 16 de maio de 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Canôas, Ana Carolina Garcia	
C165L	Lógica nebulosa e técnica de otimização particle swarm aplicadas ao controle de tensão e de potência reativa / Ana Carolina Garcia Canôas. – Campinas, SP: [s.n.], 2008.
	 Orientador: Carlos Alberto Favarin Murari Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
	 1. Lógica difusa. 2. Otimização. 3. Potência reativa. (Engenharia elétrica). 4. Controle de tempo real. 5. Sistemas de energia elétrica - Controle. I. Murari, Carlos Alberto Favarin. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III.
	Título

Título em Inglês: Fuzzy logic and particle swarm optimization for reactive power and voltage control

Palavras-chave em Inglês: Fuzzy logic, Optimization, Voltage control, Reactive power control, Fuzzy rules, Particle swarm, Voltage profile

Área de concentração: Energia Elétrica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora: Marcos Theodor Schilling, Mário Oleskovicz, Luiz Carlos Pereira da Silva, Walmir de Freitas Filho

Data da defesa: 16/05/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

## COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

**Candidata:** Ana Carolina Garcia Canôas

**Data da Defesa:** 16 de maio de 2008

**Título da Tese:** "Lógica Nebulosa e Técnica de Otimização Particle Swarm Aplicadas ao Controle de Tensão e de Potência Reativa"

Prof. Dr. Carlos Alberto Favarin Murari (Presidente):



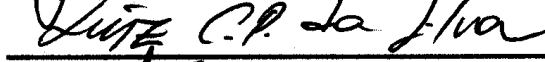
Prof. Dr. Mario Oleskovicz:



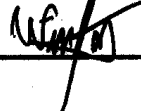
Prof. Dr. Marcus Theodor Schilling:



Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva:



Prof. Dr. Walmir de Freitas Filho:



# Agradecimentos

Ao professor Carlos Alberto F. Murari, pela excelente orientação, amizade e auxílio constante ao longo destes anos.

Ao DSEE nas pessoas de seus professores: André, Ariovaldo, Carlos Castro, Carlos Murari, Sato, Luiz Carlos, Vivaldo e Walmir, com os quais pude aprender muito e pelo excelente ambiente de trabalho que propiciam aos estudantes de pós-graduação.

As secretárias Edna e Suzete por sempre serem prestativas e atenciosas.

A todos os amigos do DSEE, que de alguma forma contribuíram neste trabalho. Oportunamente agradeço aos demais amigos que fiz e convivi pela amizade, e incentivo.

A UNIFEB onde me graduei e onde tudo começou, e que me recebeu da melhor forma possível como parte do seu corpo docente.

Em especial agradeço aos meus pais José Urbano e Cidinha, pela vida, por tudo que me ensinaram, pelo exemplo de integridade que me passaram, pelo amor incondicional e indiscutível que me deram, permitindo assim que os meus sonhos fossem realizados.

Ao Neto, e a Érika, pela inesgotável fonte de amor, carinho, incentivo e por sempre terem acreditado e torcido por meu sucesso.

Ao Eduardo, pelo amor, carinho, dedicação, compreensão e companheirismo. Pela constante ajuda nesta jornada e por sempre me incentivar a progredir.

A Deus, por me guiar a cada dia.

À CAPES pelo apoio financeiro.

# Resumo

Devido ao crescente aumento da demanda de energia elétrica e ao retardo de investimento na expansão dos sistemas de energia elétrica (SEE), a operação destes sistemas está cada vez mais próxima de seus limites operacionais, contribuindo para maior complexidade dos SEE. Neste sentido, para satisfazer as rígidas condições de operação, um gerenciamento do perfil de tensão e fluxo de potência tem se tornado cada vez mais importante para as concessionárias, de modo a aumentar a segurança operacional dos sistemas e otimizar o uso de fontes de potência reativa, visando suprir aos consumidores energia dentro de determinados padrões de qualidade e confiabilidade.

O objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de metodologias com o objetivo de monitorar o perfil de tensão, mantendo-o dentro dos limites operativos, visando não perder a qualidade de fornecimento de energia elétrica.

O primeiro método trata-se de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão dos operadores nos centros de controle, baseada em um conjunto de regras nebulosas, o qual é a base do sistema de inferência fuzzy (ou nebulosa) que por sua vez se fundamenta na teoria de conjuntos nebulosos.

Considerando que o problema de controle de tensão e de potência reativa apresenta características de natureza não-linear e que envolve variáveis de controle contínuas e discretas, foi desenvolvido um segundo método, o qual utiliza lógica nebulosa em conjunto com a técnica de otimização particle swarm. Este método mostra a possibilidade de incorporar lógica nebulosa em algoritmos baseados em busca, possibilitando a redução das perdas do sistema, satisfazendo as restrições de operação, e garantindo que o perfil de tensão mantenha-se dentro dos limites operativos com uma melhor utilização das fontes de potência reativa.

# Abstract

Due to the growing electrical power demand and the lag of transmission system infrastructure, the operation of transmission systems approaches to its limits and increases the complexity of the system operation. In this context, in order to satisfy the more rigid operating conditions, managing voltage profile and power flow in a more effective way becomes very important to the power companies that have the aim of enhancing the operating conditions and optimizing reactive power sources to provide the consumers with an adequate quality and reliability standards.

The main objective of this research work is the development of methodologies for monitoring the voltage profile in order to keep it within operating limits and preserving the quality of the energy being served.

The first method consists of a tool for helping decision making by system operators in control centres. This method is based on a set of fuzzy rules, which are the base of a fuzzy inference system.

Considering that the voltage and reactive power control present nonlinear characteristics and mixed continuous and discrete variables, a hybrid meta-heuristic method based on fuzzy system and particle swarm optimization has been developed. The fuzzy system has been incorporated into swarm intelligence to provide operational point that allows reduction of system losses while satisfies the operational limits, voltage constraints and the best utilisation of reactive power.

# Sumário

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Glossário</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 O Problema de Controle de Tensão e de Potência Reativa</b>	<b>5</b>
2.1 Transmissão de Potência Reativa . . . . .	6
2.1.1 O Efeito da Transmissão de Potência Reativa . . . . .	8
2.2 Controle Hierárquico de Tensão . . . . .	9
2.3 Equipamentos para Controle de Tensão . . . . .	10
2.3.1 Gerador Síncrono . . . . .	10
2.3.2 Regulador Automático de Tensão . . . . .	11
2.3.3 Linhas de Transmissão . . . . .	12
2.3.4 Transformador com Mudança de Tap sob Carga . . . . .	12
2.3.5 Reguladores de Tensão . . . . .	14
2.3.6 Capacitor em Derivação . . . . .	14
2.3.7 Reator em Derivação . . . . .	15
2.3.8 Capacitor em Série . . . . .	16
2.3.9 Compensador Síncrono ou Condensador Síncrono . . . . .	17
2.3.10 Compensador Estático de Reativos . . . . .	18

2.4	Trabalhos na Área de Controle da Tensão e de Potência Reativa . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Lógica Nebulosa</b>	<b>27</b>
3.1	Lógica Nebulosa . . . . .	27
3.2	Conjuntos Nebulosos . . . . .	30
3.3	Função de Pertinência . . . . .	32
3.3.1	Função de Pertinência Sinusoidal . . . . .	32
3.4	Sistemas de Inferência Nebulosa . . . . .	33
3.5	Lógica Nebulosa Aplicada em Sistemas de Elétricos de Potência . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Otimização Particle Swarm</b>	<b>37</b>
4.1	Introdução . . . . .	37
4.2	Procedimento de Busca . . . . .	39
4.3	Estrutura Básica do Algoritmo Particle Swarm . . . . .	43
<b>5</b>	<b>Metodologias Propostas</b>	<b>45</b>
5.1	Controle de Tensão e de Potência Reativa Baseado em Regras Nebulosas . . . . .	46
5.2	Utilização dos Dispositivos de Controle . . . . .	50
5.3	Controle de Tensão e de Potência Reativa Utilizando Lógica Nebulosa e Particle Swarm	51
5.4	Comentários Gerais . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Testes e Resultados</b>	<b>55</b>
6.1	Metodologia A: . . . . .	55
6.1.1	Sistema IEEE-14 barras . . . . .	56
6.1.2	IEEE-30 barras . . . . .	59
6.1.3	Sistema Real . . . . .	67
6.2	Metodologia B . . . . .	77
6.2.1	Sistema WARD & HALE . . . . .	78
6.2.2	Sistema IEEE-14 . . . . .	80
6.2.3	Sistema IEEE-30 . . . . .	82



6.2.4 Sistema Real . . . . .	86
<b>7 Conclusões</b>	<b>95</b>
7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	98
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>98</b>
<b>A Fluxo de Carga Nebuloso</b>	<b>107</b>
<b>B Banco de Dados</b>	<b>117</b>
<b>C Divulgação da Pesquisa</b>	<b>129</b>

# Lista de Tabelas

6.1	Limites operacionais - IEEE-14 barras . . . . .	56
6.2	Estado da rede - caso base (IEEE-14 barras) . . . . .	57
6.3	Regras Utilizadas . . . . .	57
6.4	Resultados após o controle - regra R1 (IEEE-14 barras) . . . . .	58
6.5	Resultados após o controle - regra R2 (IEEE-14 barras) . . . . .	58
6.6	Resultados após o controle - regra R6 (IEEE-14 barras) . . . . .	58
6.7	Resultados após o controle - regra R3 (IEEE-14 barras) . . . . .	59
6.8	Estado da rede - final (IEEE-14 Barras) . . . . .	59
6.9	Limites Operacionais - IEEE-30 barras . . . . .	60
6.10	Estado da rede - base case (IEEE-30 barras) . . . . .	60
6.11	Regras Utilizadas . . . . .	61
6.12	Resultados após regra R2 (IEEE-30 barras) . . . . .	62
6.13	Resultados após regra R6 (IEEE-30 barras) . . . . .	62
6.14	Estado da rede - final (IEEE-30 barras) . . . . .	63
6.15	Estado da rede - redução de carga (IEEE-30 barras) . . . . .	64
6.16	Resultado após regra R2 - redução de carga (IEEE-30 barras) . . . . .	65
6.17	Resultados após R6 - redução de carga (IEEE-30 barras) . . . . .	65
6.18	Estado de rede - final (redução de carga - IEEE-30 barras) . . . . .	66
6.19	Limites Operacionais - Rede Real . . . . .	67
6.20	Estado da rede real - caso base . . . . .	68
6.21	Regras Utilizadas . . . . .	70

6.22	Resultados após o controle - regra R1 (Sistema Real) . . . . .	71
6.23	Resultados após o controle - regra R6 e R4 (Sistema Real) . . . . .	72
6.24	Estado da rede real - final . . . . .	73
6.25	Limites operacionais das variáveis de controle - WARD & HALE . . . . .	78
6.26	Estado da rede - caso base (Ward & Hale) . . . . .	79
6.27	Estado da rede - final (Ward & Hale) . . . . .	79
6.28	Variáveis de controle - valores finais (Ward & Hale) . . . . .	79
6.29	Limites operacionais para as variáveis de controle - IEEE-14 barras . . . . .	80
6.30	Estado da rede - caso base (IEEE-14 barras) . . . . .	81
6.31	Representação dos dispositivos de controle . . . . .	81
6.32	Estado da rede - final (IEEE-14 barras) . . . . .	82
6.33	Limites operacionais para as variáveis de controle - IEEE-30 barras . . . . .	83
6.34	Estado da rede - caso base (IEEE-30 barras) . . . . .	83
6.35	Estado da rede - final (IEEE-30 barras) . . . . .	84
6.36	Representação dos dispositivos de controle . . . . .	85
6.37	Limites operacionais para as variáveis de controle - Sistema Real . . . . .	86
6.38	Estado da rede real - caso base . . . . .	87
6.39	Representação dos dispositivos de controle . . . . .	89
6.40	Estado final - Sistema Real . . . . .	89
B.1	Dados de Barra - Sistema Real . . . . .	117
B.2	Dados de Linha - Sistema Real . . . . .	122

# Lista de Figuras

2.1	Modelo simplificado de sistema de potência . . . . .	6
2.2	Curva $P-\theta$ . . . . .	7
2.3	Excitação do gerador síncrono . . . . .	11
2.4	Diagrama de blocos do RAT . . . . .	12
2.5	Diagrama esquemático do circuito de controle do LDC . . . . .	14
2.6	Capacitor série em uma linha . . . . .	17
2.7	Esquema básico do CER . . . . .	18
3.1	Função Sinusoidal . . . . .	33
3.2	Sistema de Inferência Nebulosa . . . . .	34
4.1	Conceito da evolução do ponto de busca . . . . .	40
4.2	Conceito do PSO estendido para representação de um PNLIM . . . . .	42
4.3	Estrutura básica do algoritmo particle swarm . . . . .	44
5.1	Fluxograma Simplificado da Aplicação Baseada em Regras . . . . .	47
5.2	Exemplo Completo do Sistema de Inferência . . . . .	48
5.3	Representação da função de pertinência sinusoidal . . . . .	52
6.1	Magnitudes das Tensões - Caso Base . . . . .	75
6.2	Magnitude das Tensões - Estado final . . . . .	76
6.3	Magnitudes das Tensões - Caso Base . . . . .	92
6.4	Magnitude das Tensões - Estado final . . . . .	92

A.1	Função Sinusoidal . . . . .	112
-----	-----------------------------	-----

# Glossário

CER - Compensador Estático de Reativos

FCN - Fluxo de Carga Nebuloso

FCNS - Fluxo de Carga Nebuloso Sinusoidal

LTC - *Load Tap Changing* - Transformador com Mudança de Tap Sob Carga

PSO - *Particle Swarm Optimization* - Otimização Particle Swarm - Otimização por Nuvem de Partícula

SEE - Sistemas de Energia Elétrica

SEP - Sistemas Elétricos de Potência

RAT - Regulador Automático de Tensão

# Capítulo 1

## Introdução

Os sistemas elétricos de potência (SEP) estão operando cada vez mais próximos de seus limites operacionais, devido à complexidade do sistema que envolve fatores econômicos e ambientais, adicionado ao crescente aumento da demanda e o retardo de investimentos na expansão dos sistemas de energia elétrica (SEE). O processo de reestruturação do setor elétrico tem contribuído para a ocorrência de fatores que o tornam menos robusto e mais vulnerável. A reestruturação visa minimizar investimentos e custos e maximizar a utilização dos equipamentos (Morison et al., 2004). Neste sentido, para satisfazer as rígidas condições de operação, um gerenciamento de perfil de tensão e fluxo de potência reativa tem se tornado cada vez mais importante para as concessionárias, de modo a aumentar a segurança operacional do sistema e otimizar o uso de fontes reativas, fornecendo, desta forma energia dentro dos padrões de qualidade e confiabilidade para o consumidor (Vu et al., 1996).

O mau condicionamento do perfil de tensão em SEP é um importante indicador de desequilíbrio da potência reativa. Como a magnitude da tensão é uma grandeza que reflete a qualidade da energia elétrica, qualquer desvio do valor nominal pode ser prejudicial e oneroso, e portanto, o controle de potência reativa é uma ferramenta essencial para preservar a qualidade de fornecimento de energia elétrica (Bansal et al., 2003).

Manter as magnitudes das tensões em níveis aceitáveis, garantindo o suprimento de energia, é uma das exigências mínimas e para isto, as condições de operação podem requerer o controle de fluxo de potência reativa nas ligações, sendo imprescindível a atuação de dispositivos de controle de potência reativa e da magnitude da tensão. É fato que, algumas magnitudes das tensões podem violar um dos limites, superior ou inferior, devido a alguns distúrbios de operação e/ou mudanças de configuração dos sistemas. Estas condições podem ser aliviadas e as magnitudes das tensões podem manter-se dentro de seus limites permitidos pela realocação de potência reativa no sistema, como por exemplo, ajuste de tensão nos geradores, alteração de tap de transformador e outros possíveis controles.

O controle da magnitude da tensão é um aspecto importante a ser considerado na operação de um SEP, bem como, na avaliação da qualidade de fornecimento de energia elétrica. As potências nas barras de um sistema variam hora a hora, e as magnitudes das tensões acompanham tais variações, deste modo, pode-se então tratá-las como grandezas nebulosas, diferentemente dos métodos clássicos que consideram estas grandezas constantes.

Assim, o objetivo principal desta pesquisa é o desenvolvimento de metodologias com o objetivo de monitorar o perfil de tensão, mantendo-o dentro dos limites operativos, visando não perder a qualidade de fornecimento de energia elétrica.

O primeiro método trata-se de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão dos operadores nos centros de controle, baseada em um conjunto de regras nebulosas, o qual é à base do sistema de inferência fuzzy (ou nebulosa) que por sua vez se fundamenta na teoria de conjuntos nebulosos.

A lógica nebulosa pode ser eficientemente aplicada em problemas de controle de tensão e de potência reativa devido à complexidade e à natureza não-linear da relação entre potência reativa e tensão (Bansal, 2003).

Considerando que o problema de controle de tensão e de potência reativa apresenta características de natureza não-linear e que envolve variáveis de controle contínuas e discretas, foi desenvolvido um segundo método, o qual utiliza lógica nebulosa em conjunto com a técnica de



otimização particle swarm. Este método mostra a possibilidade de incorporar lógica nebulosa em algoritmos baseados em busca, possibilitando a redução das perdas do sistema, satisfazendo as restrições de operação, e garantindo que o perfil de tensão mantenha-se dentro dos limites operativos com uma melhor utilização das fontes de potência reativa.

A tese foi elaborada da maneira descrita a seguir. Este capítulo 1 mostra as motivações e objetivos do trabalho. O capítulo 2 apresenta alguns conceitos sobre controle de tensão e de potência reativa. Os capítulos 3 e 4 apresentam conceitos sobre lógica nebulosa e técnica de otimização particle swarm, respectivamente. O capítulo 5 é constituído pela descrição das duas metodologias propostas no trabalho e os resultados são apresentados no capítulo 6. As considerações finais são apresentadas no capítulo 7.

Finalmente, no apêndice A contém informações sobre o fluxo de carga nebuloso. No apêndice B é apresentado os dados do sistema real, enquanto que no apêndice C cita as publicações realizadas.

## Capítulo 2

# O Problema de Controle de Tensão e de Potência Reativa

O controle de tensão tem sido alvo de intensa investigação, o que pode ser comprovado pela quantidade significativa de artigos publicados e em boa parte citados na referência bibliográfica deste trabalho. Pode-se considerá-lo um tema bastante atual devido às condições críticas em que se encontra a operação dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), estando próximos de seus limites operacionais, além dos recursos que estão se esgotando devido ao retardo de investimentos (Morison et al., 2004). Assim, devido à complexidade crescente dos SEP e das rígidas condições de operação, torna-se necessário um melhor gerenciamento do perfil de tensão e do fluxo de potência reativa no sistema, de modo a otimizar o uso de fontes de potência reativa (Vu et al., 1996).

Este capítulo contempla alguns conceitos e definições relacionados ao problema de controle da magnitude da tensão e dos fluxos de potência reativa, e também alguns relatos de trabalhos encontrados na literatura que abordam este tema.

## 2.1 Transmissão de Potência Reativa

A transmissão de potência reativa depende principalmente dos valores das magnitudes das tensões nodais. Para validar esta afirmação, assume-se um modelo simplificado de sistema de potência, onde a resistência da linha é desprezada, conforme mostra a figura 2.1.

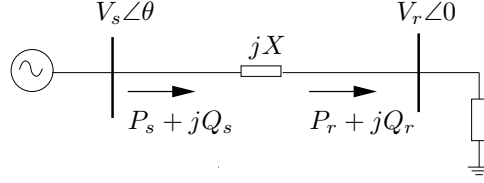


Figura 2.1: Modelo simplificado de sistema de potência

A potência complexa na barra terminal pode ser expressa por:

$$S_r = P_r + jQ_r = V_r \angle 0 \times \hat{I}^* = V_r \angle 0 \times \left( \frac{V_s \angle \theta - V_r \angle 0}{jX} \right)^* \quad (2.1)$$

$$S_r = V_r \times \left( \frac{V_s \times \cos \theta + jV_s \times \sin \theta - V_r}{jX} \right)^* \quad (2.2)$$

$$S_r = \frac{V_s V_r}{X} \times \sin \theta + j \frac{V_s V_r \times \cos \theta - V_r^2}{X} \quad (2.3)$$

e portanto, para a carga, tem-se:

$$P_r = \frac{V_s V_r}{X} \times \sin \theta \quad (2.4)$$

$$Q_r = \frac{V_s V_r \times \cos \theta - V_r^2}{X} \quad (2.5)$$

e para o gerador, seguindo o mesmo procedimento, obtém-se:

$$P_s = \frac{V_s V_r}{X} \times \sin \theta \quad (2.6)$$

$$Q_s = \frac{V_s^2 - V_s V_r \times \cos \theta}{X} \quad (2.7)$$

Para a potência ativa, constata-se que  $P_s = P_r$  pois o efeito resistivo da linha foi desconsiderado, e, para a potência reativa, verifica-se que  $Q_s \neq Q_r$ , dado que  $V_s \neq V_r$ .

Nesta formulação,  $\theta$  corresponde ao ângulo de defasagem entre as tensões nodais e portanto, a potência ativa transmitida atingirá o valor máximo ( $P_{max}$ ) quando  $\theta = 90^\circ$ , como mostra a figura 2.2.

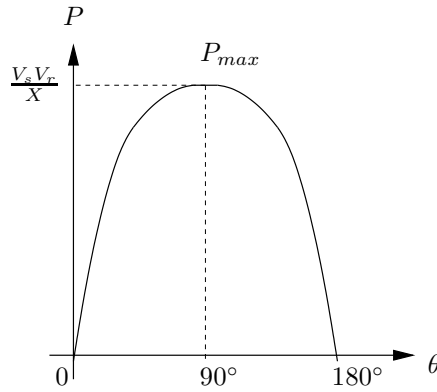


Figura 2.2: Curva P- $\theta$

Note que, para baixos valores de  $\theta$ , tem-se  $\sin \theta \approx \theta$  e portanto  $P_r = P_s = P_{max} \theta$ , o que confirma um fato bem conhecido que a transferência de potência ativa depende principalmente da diferença angular entre as tensões nodais.

Para avaliar a variação de potência reativa no tempo, considere inicialmente  $V_s = V_r$ . Neste caso, constata-se:

$$Q_s = -Q_r = \frac{V_r^2 - V_r^2 \times \cos \theta}{X} \quad (2.8)$$

E para  $\theta = 90^\circ$ , conclui-se que a potência reativa nas duas barras é igual a  $P_{max}$ .

Detalhe: sabe-se que a operação estável só é possível para  $\theta < 90^\circ$  (Elgerd, 1982).

Sendo  $V_s \neq V_r$  e para baixos valores de  $\theta$ , assume-se  $\cos \theta \approx 1$ , implicando que as expressões 2.5 e 2.7 possam ser aproximadas por:

$$Q_r \approx V_r \left( \frac{V_s - V_r}{X} \right) \quad Q_s \approx V_s \left( \frac{V_s - V_r}{X} \right) \quad (2.9)$$

Assim, pode-se inferir que a transmissão de potência reativa depende principalmente da magnitude da tensão e que, a princípio, flui das barras com magnitude de tensão maior para as barras com tensão menor.

### 2.1.1 O Efeito da Transmissão de Potência Reativa

Ainda com relação à figura 2.1, considere os seguintes valores (Costa, 2002):

$$V_s = 1,0 \text{ pu}; \quad V_r = 0,95 \text{ pu} \quad \text{e} \quad \theta = 30^\circ$$

Dessa forma:

$$Q_s = \frac{1,0^2 - 1,0 \times 0,95 \times 0,866}{X} = \frac{0,18}{X} \text{ pu} \quad \text{e} \quad Q_r = \frac{1,0 \times 0,95 \times 0,866 - 0,95^2}{X} = -\frac{0,08}{X} \text{ pu}$$

E portanto, tanto na barra de geração como na de carga ocorre uma injeção de potência reativa devido ao efeito indutivo da linha, correspondendo a uma potência reativa de  $Q = \frac{0,26}{X}$  pu.

Este exemplo ilustra que não há fluxo de potência reativa de uma barra para outra quando o ângulo de defasagem entre as tensões é elevado. Isto ocorre para linhas longas, em condição de carga pesada e o problema é agravado porque não se pode ter diferenças acentuadas entre as magnitudes das tensões, já que normalmente se exige  $V = 1,0 \pm 0,05$  pu.

Esta não é a única razão que limita o transporte de potência reativa na rede. Dado que as perdas de transmissão são função direta do quadrado da potência reativa transmitida e do inverso do quadrado da tensão, sob o ponto de vista econômico é desejável minimizar o transporte de potência reativa nas linhas de transmissão, além de assegurar tensões nominais.

Outra desvantagem do transporte de potência reativa está associada ao fato de que em circuitos elétricos, ela sobrecarrega as instalações, ocupando uma capacidade de condução de corrente que poderia ser melhor aproveitada.

## 2.2 Controle Hierárquico de Tensão

O problema de controle das magnitudes das tensões e dos fluxos de potência reativa é de grande escala e pode ser estruturado em três diferentes níveis de controle, de forma hierárquica. Cada um desses níveis de controle tem uma função e ações de controle específicas, que são descritas a seguir (Conejo e Aguilar, 1998; Taranto et al., 2000):

### Controle Primário de Tensão

O controle primário ou local, também denominado de controle individual de geradores, consiste basicamente na atuação dos reguladores automáticos de tensão (RAT), os quais tentam manter as tensões terminais dos geradores próximas aos valores de referência fornecidos pelo operadores do sistema ou pelo nível mais alto (controle secundário). O tempo de resposta de um controle primário é da ordem de poucos segundos.

### Controle Secundário de Tensão

O controle secundário ou regional tem como objetivo principal o ajuste e a manutenção do perfil de tensão dentro de uma área de atuação. Este nível de controle é realizado ajustando individualmente os reguladores automáticos de tensão dos geradores, compensadores estáticos ou síncronos, tap de transformador, etc, visando manter o perfil de tensão desejado nas barras especificadas. O tempo de resposta varia de alguns segundos a poucos minutos.

### Controle Terciário de Tensão

O controle terciário tem como principal função determinar um perfil de tensão ótimo para o sistema e coordenar os controles secundários de acordo com critérios econômicos e de segurança.

Isto é possível através da solução de um problema de otimização de grande escala tal como um fluxo de potência ótimo com o objetivo, por exemplo, de minimizar perdas de potência ativa da rede elétrica considerando restrições de segurança. Ou seja, a reserva disponível de geração de potência reativa é otimizada para manter o perfil de tensão adequado. A função objetivo também pode ser a maximização da reserva de potência reativa, cujas restrições são associadas aos limites de tensão nas principais barras do sistema.

## 2.3 Equipamentos para Controle de Tensão

O gerenciamento adequado do fluxo de potência reativa é necessário para, dentre outras razões:

- garantir o melhor aproveitamento do sistema elétrico existente;
- propiciar equilíbrio no balanço geração/consumo de potência reativa;
- monitorar os fatores de potência tanto da carga quanto da rede;
- disponibilizar para estratégia adequada para o controle de tensão, garantindo uma operação segura do sistema.

Apresenta-se a seguir, uma descrição do comportamento dos principais elementos que interferem no controle de tensão e potência reativa em um sistema elétrico de potência e que estão relacionados com o controle de injeção de fluxo de potência reativa.

### 2.3.1 Gerador Síncrono

Um gerador síncrono, principal fonte de potência ativa nos sistemas de energia elétrica, pode gerar ou absorver potência reativa em função do ajuste da intensidade da respectiva corrente de campo. A capacidade de consumo ou fornecimento de potência reativa está vinculada a limites

físicos de projeto tais como limites da capacidade térmica da máquina e a problemas dinâmicos de operação do sistema de energia elétrica, associados a limites de estabilidade transitória (Kundur, 1994). Quando o gerador síncrono é sobreexcitado (corrente de campo com valor tendendo ao valor nominal), ele fornece potência reativa ao sistema, enquanto que, quando subexcitado (corrente de campo baixa, tendendo ao valor zero), ele absorve potência reativa da rede. O gerador síncrono é normalmente equipado com um RAT, o qual ajusta a excitação de forma a realizar o controle de tensão (Kundur, 1994). Uma importante característica do gerador síncrono é a sua capacidade de responder rapidamente a perturbações e por vezes, é a única reserva reativa disponível na operação do sistema, que pode ser usada na ocorrência de um distúrbio que necessita de resposta rápida.

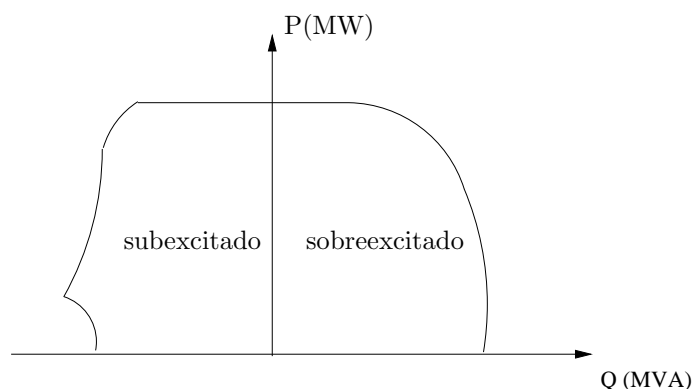


Figura 2.3: Excitação do gerador síncrono

### 2.3.2 Regulador Automático de Tensão

O regulador automático de tensão (RAT) é um dispositivo de controle que procura manter a tensão terminal do gerador ou do compensador síncrono num dado valor de referência. A regulação é obtida através do sistema de excitação do gerador, que consiste em suprir e ajustar automaticamente a corrente de campo do gerador síncrono, de forma a manter a tensão terminal da máquina no respectivo valor especificado.

A figura 2.4 mostra o diagrama de blocos simplificado representando a malha de regulação



de tensão de um gerador. A tensão terminal ( $V_t$ ) é comparada com a tensão de referência especificada ( $V_{Ref}$ ), gerando um sinal de erro ( $e$ ) que é aplicado no regulador de tensão. O sinal de saída é a tensão de campo ( $E_{fd}$ ), que é aplicada no controle de campo do gerador, ajustando assim a tensão terminal.

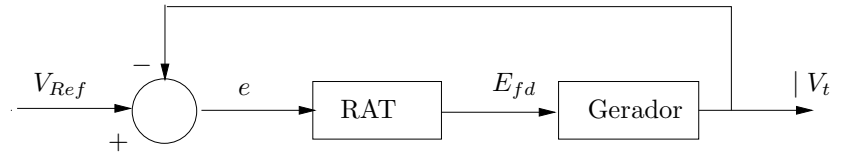


Figura 2.4: Diagrama de blocos do RAT

### 2.3.3 Linhas de Transmissão

Conforme definição clássica (Stenvenson, 1977), as linhas de transmissão constituem as artérias do sistema de energia elétrica. Devido a características próprias, uma linha de transmissão equivale a um capacitor ou reator, dependendo do valor do respectivo carregamento. Em condições de carga pesada a corrente é elevada, e sendo a potência reativa fornecida diretamente proporcional ao quadrado da tensão, tem-se uma condição crítica para a estabilidade de tensão, pois as perdas elétricas e a queda de tensão na LT podem atingir níveis elevados. No patamar de carga leve a situação se inverte, com tendência a se ter níveis de tensão elevados nas barras terminais, podendo, neste caso, a tensão na barra ser controlada por reatores.

### 2.3.4 Transformador com Mudança de Tap sob Carga

Em sistemas de potência, o transformador é frequentemente utilizado para o controle de tensão e do fluxo de potência reativa no sistema, além de sua tradicional função de transformação dos níveis de tensão (Kundur, 1994). Por esta razão, grande parte dos transformadores utilizados nos sistemas de transmissão e subtransmissão e alguns utilizados na distribuição de energia elétrica, possui tap variável com o objetivo de possibilitar a mudança na respectiva relação de

transformação, pois do ponto de vista operacional, tal mudança é necessária para compensar eventual variação na magnitude da tensão nodal oriunda de variações na carga ou de alterações topológicas do sistema. A alteração da magnitude da tensão permite o controle e a redistribuição do fluxo de potência reativa no sistema, melhorando seu perfil de tensão.

A alteração do tap de um transformador e a conseqüente alteração da relação de transformação, ocorre através de um dispositivo denominado comutador, projetado para atuar com ou sem carga. O comutador com atuação sem carga necessita que o transformador esteja desenergizado para a alteração manual do respectivo tap. Sendo que este tipo de dispositivo é indicado para situações em que a relação de transformação do transformador necessite ser alterada frequentemente.

O comutador que atua sob carga, é utilizado quando a alteração na relação de transformação é freqüente, por exemplo, em casos em que há flutuações dos níveis de tensão do sistema em períodos diários ou horários, provenientes de incrementos ou decrementos de carga no sistema. Na literatura, o comutador sob carga pode ser denominado ULTC (*Under Load Tap Changing*), OLTC (*On Load Tap Changing*), LTC (*Load Tap Changing*), ou ainda TCUL (*Tap Changing Under Load*). Este tipo de dispositivo é muito utilizado pelas concessionárias de energia elétrica, uma vez que este tipo de comutação é realizado com o transformador energizado, não necessitando interromper o fornecimento de energia aos consumidores. Tal tipo de transformador constitui-se em importante equipamento para o controle de tensão e potência reativa, em todos os níveis dos sistemas de energia elétrica, uma vez que nele o ajuste dos níveis de tensão ocorre pela alteração automática da relação de transformação. Geralmente o comutador é instalado no lado de alta tensão do transformador, o que pode ser justificado pelo fato de a corrente no lado de alta tensão ser menor do que no lado de baixa tensão e existe um número maior de espiras disponíveis, o que contribui para um ajuste mais preciso dos níveis de tensão.

A calibração adequada dos taps existentes pode adiar a necessidade de instalação de novas fontes de potência reativa.

### 2.3.5 Reguladores de Tensão

Os reguladores de tensão são usados freqüentemente em redes de distribuição para o controle da tensão em cada fase da rede separadamente, visando manter a tensão dentro de limites seguros de operação nos pontos de carga. Um regulador de tensão é fundamentalmente um autotransformador com tap variável, dispondo de um circuito de controle responsável pela comutação (variação do tap) sempre que a tensão na saída do regulador violar limites predeterminados, como representado na figura 2.5. Um tipo especial de regulador é o LDC (*Line Drop Compensator*), cuja função principal é a de controlar a magnitude da tensão em pontos remotos do alimentador.

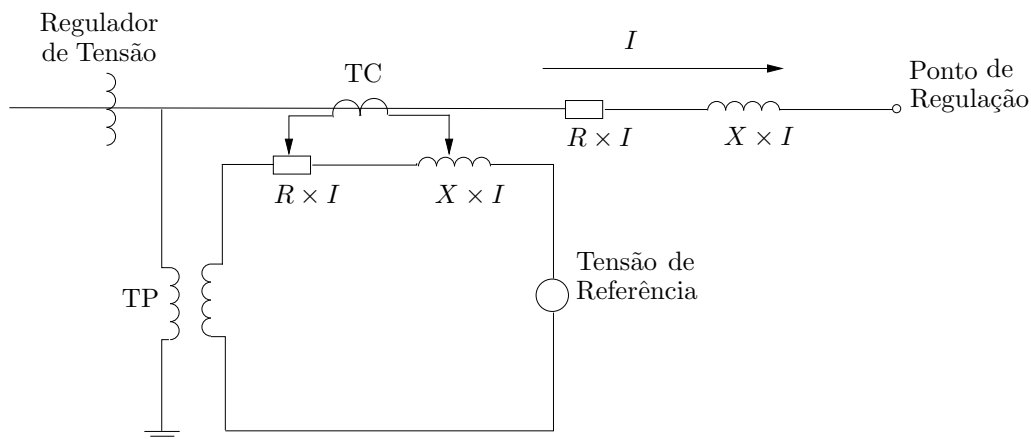


Figura 2.5: Diagrama esquemático do circuito de controle do LDC

### 2.3.6 Capacitor em Derivação

O capacitor em derivação é utilizado para compensar o efeito indutivo característico em boa parte das linhas de transmissão e subtransmissão, a fim de garantir níveis de tensão satisfatórios principalmente durante as condições de carga pesada. Em níveis de distribuição de energia, o capacitor *shunt* é bastante utilizado com a função de garantir suporte de potência reativa para as redes elétricas em baixa tensão e conseqüentemente assegurar um satisfatório perfil de tensão no alimentador e melhoria do fator de potência do sistema como um todo. A utilização de

bancos de capacitores ao longo dos alimentadores de forma desordenada, geralmente, tem duas implicações principais (Weddy e Cory, 1998):

- o alimentador torna-se “fraco”: a princípio, capacitores corretamente dimensionados, injetam uma quantidade de potência reativa no sistema assegurando que o alimentador opere com tensões próximas da nominal, caracterizando um alimentador aparentemente seguro. No entanto, durante situações de manobra ou de emergência, em que ocorram afundamentos da tensão em algumas partes do alimentador, a quantidade de reativos injetada pelos capacitores diminui contribuindo para agravar ainda mais a situação do alimentador, pois a quantidade de potência reativa proveniente dos capacitores varia com o quadrado da magnitude da tensão.
- sobretensões em períodos de carga leve: durante os períodos em que a carga do sistema diminui (à noite, por exemplo) pode ocorrer uma elevação da tensão ao longo do alimentador, tendo como possíveis conseqüências avarias em equipamentos atendidos por aquele alimentador.

Por outro lado, as principais vantagens do capacitor em derivação são seu baixo custo de aquisição e de instalação aliado a uma flexibilidade na operação deste equipamento (Júnior, 2002; de Albuquerque, 2002).

### 2.3.7 Reator em Derivação

Em sistemas de potência, um reator em derivação é empregado para controlar as tensões nos barramentos, com o objetivo de compensar o efeito capacitivo característico em linhas longas sob alta tensão principalmente durante períodos de carga leve, o que provoca aumento significativo das magnitudes das tensões nas barras terminais, resultando em um aumento de tensão em todo o sistema (Júnior, 2002).

O reator também é um equipamento importante para o planejamento e o controle ótimo

de reativos, podendo ser único (uma única capacidade de MVA), ou bancos que permitem um melhor ajuste da capacidade dependendo das condições de carga do sistema. Em geral, em linhas longas pode ser conectado no sistema de dois modos (Mantovani, 1995):

1. permanente: ligado durante todo o tempo e atua na limitação de sobretensões temporárias na frequência fundamental e também para transitórios durante a rejeição de carga;
2. temporário: conectado à LT durante os períodos de carga leve e condições de restabelecimento do sistema.

### 2.3.8 Capacitor em Série

A utilização de capacitor série vinha sendo tradicionalmente associada com longas linhas de transmissão. Hoje em dia, entretanto, o capacitor série está sendo utilizado também em linhas curtas e, até mesmo, em alimentadores de distribuição (Taylor, 1994). Este equipamento é instalado em série com a linha, ou alimentador, com o objetivo de compensar a sua reatância indutiva. Com isso, a impedância total do circuito sofre uma redução e, por conseguinte, a distância elétrica entre as barras terminais da linha, ou alimentador, é reduzida.

As principais vantagens e características associadas à utilização do capacitor série são citadas a seguir (Mantovani, 1995):

- aumento do limite máximo de transferência de potência na linha;
- aumento da margem de estabilidade do sistema;
- melhor distribuição de potência entre as linhas, reduzindo as perdas globais do sistema;
- a potência reativa suprida por um capacitor série é proporcional ao quadrado da corrente na linha, sendo independente da tensão da barra.

A melhor utilização de uma linha de transmissão, em termos econômicos, ocorre a nível relativamente alto de carregamento, o que resulta, normalmente, na predominância de sua ca-

racterística indutiva e em maiores diferenças quanto à magnitude e ângulo das tensões em suas extremidades. A compensação série capacitiva permite então, a redução dessas diferenças e uma utilização mais eficiente da linha.

Embora um capacitor série não seja instalado usualmente para o controle de tensão, ele pode contribuir para a melhoria do perfil de tensão e do balanço de potência reativa, uma vez que a potência reativa produzida por ele, aumenta com o incremento da potência transferida (Miller, 1982).

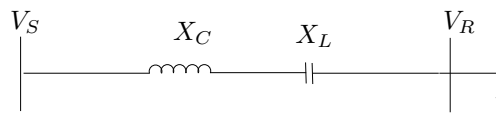


Figura 2.6: Capacitor série em uma linha

### 2.3.9 Compensador Síncrono ou Condensador Síncrono

O compensador ou condensador síncrono têm um papel importante no controle de tensão e de potência reativa, sendo conectado em nível de transmissão e subtransmissão para aumentar a margem de estabilidade de tensão e manter os níveis de tensão dentro de limites desejáveis, sob condições de variação de carga e situações de emergência (Kundur, 1994; Miller, 1982).

Um condensador síncrono é uma máquina síncrona operando sem carga mecânica e, dependendo da magnitude da corrente de campo (excitação), pode gerar ou absorver grandes quantidades de potência reativa (MVA). Uma grande vantagem do compensador síncrono é sua flexibilidade de operação em todas as condições de carga do sistema, pois ele apresenta uma resposta rápida (um ou dois segundos) a desvios de tensão no sistema.

Quando usado como regulador de tensão, o compensador síncrono pode, automaticamente, operar sobreexcitado em períodos de carga elevada e subexcitado em períodos de carga baixa (Miller, 1982). O compensador síncrono apresenta as seguintes vantagens operacionais quando utilizado no controle de tensão e potência reativa:

- fornece potência reativa ajustável continuamente, o que possibilita um adequado controle dos níveis de tensão do sistema;
- possui a capacidade de fornecer potência reativa (comportamento capacitivo) quanto absorvê-la (comportamento indutivo).

### 2.3.10 Compensador Estático de Reativos

O compensador estático de reativos (CER) é oriundo de uma família de sistemas de compensação de reativos *shunt*, compostos de dispositivos de chaveamento convencionais e de estado sólido (eletrônica de potência) associados a sistemas de controle que propiciam o ajuste rápido e refinado de compensações reativas necessárias para o bom desempenho de um sistema de energia elétrica (Cutsem e Vournas, 1998).

O CER é um dispositivo que atua rapidamente no suprimento de potência reativa, possibilitando uma grande margem de controle de potência reativa dentro da sua faixa de atuação. A figura 2.7 mostra um esquema simplificado do CER, a tensão da barra ( $V$ ) é comparada com uma tensão de referência ( $V_{ref}$ ), sendo o erro processado e amplificado por um controlador. Deve-se observar que o termo estático implica na falta de partes móveis do compensador e que essa compensação de potência reativa ocorre dinamicamente. Quando aplicado em sistemas de transmissão, o CER é instalado no lado de baixa tensão e é dotado de um dispositivo de controle muito eficiente no sentido de rapidamente restabelecer o valor da tensão no lado de alta tensão.

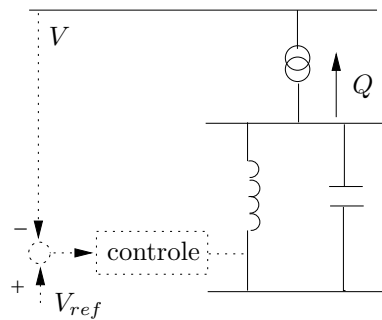


Figura 2.7: Esquema básico do CER

## 2.4 Trabalhos na Área de Controle da Tensão e de Potência Reativa

A seguir são citados alguns trabalhos relevantes dentro da área de controle de tensão e de potência reativa.

Em (Peschon et al., 1968) é proposto um método para minimizar as perdas do sistema pela seleção adequada de injeção de potência reativa através do ajuste de tap de transformador. Em (Hano et al., 1969) é apresentado um método de controle de tensão e de potência reativa em sistemas de distribuição em tempo real. Os autores determinaram a relação de sensibilidade requerida entre variáveis controladas e controláveis, e um índice de sensibilidade para as perdas, tem sido empregada uma técnica de busca direta para minimizar as perdas dos sistema.

Os dispositivos de controle para controle de tensão e de potência reativa são equipados com reguladores, que podem manter constante a tensão ou a geração de potência reativa. Entretanto, no decorrer do processo de operação, surgem variações no sistema (modificações topológicas, variações de cargas ou geração, etc) que fazem com que os modos de operação reais sejam diferentes daqueles planejados. Por isso, o controle de tensão e potência reativa pode ser inadequado para as reais condições e não dar os efeitos que seriam alcançados com o controle em tempo real. Além disso, os esquemas de controle local ou individual de tensão e potência reativa, muitas vezes falham ou ocasionam certos resultados indesejáveis. Esses tipos de problemas podem ser resolvidos mediante um controle centralizado ou descentralizado com esforços coordenados do controle local (Narita e Hamman, 1971).

No trabalho (Shoults e Chen, 1976) é proposto um algoritmo para ajuste dos taps de transformadores e das tensões terminais dos geradores requeridos para manter os fluxos de potência reativa nas linhas e as magnitudes das tensões nas barras de cargas dentro da faixa de valores desejados. O processo de otimização é realizado através da técnica dos mínimos quadráticos, tornando-se adequado para uma aplicação em tempo real.



O uso de otimização linear ou programação linear (PL) para o controle de tensão e de potência reativa em sistemas elétricos de potência é apresentado em (Hobson, 1980). Em (Mamandur e Chenoweth, 1981) foi desenvolvido uma formulação matemática para o problema de controle ótimo de potência reativa que minimiza as perdas de potência ativa do sistema. O modelo emprega relações linearizadas de sensibilidade do sistema de potência para estabelecer uma relação entre a função objetivo e o desempenho das sensibilidades do sistema relativo às variáveis dependentes e de controle. Foi utilizada uma técnica de otimização linear dual para determinar o ajuste ótimo das variáveis de controle, satisfazendo simultaneamente os limites de potência reativa dos geradores, os limites de tensão nas barras de carga e os limites operacionais das variáveis de controle, isto é, as posições dos taps de transformadores, as magnitudes das tensões nos terminais dos geradores e o chaveamento de fontes de potência reativa. De forma semelhante, também fazendo uso das relações de sensibilidade do sistema de potência para determinar a relação linearizada de sensibilidade entre as variáveis dependentes e de controle, o trabalho (Mamandur, 1982) apresenta um método para determinar o ajuste mínimo das variáveis de controle requeridas no problema de controle de potência reativa para evitar sobretensões, baixas tensões, e violações dos limites de potência reativa gerada.

Já no trabalho (Paul et al., 1987) os autores propuseram o controle secundário de tensão aplicado no sistema francês (Electricité de France), e que assumia um desacoplamento entre as regiões de controle baseado em três níveis hierárquicos do controle de tensão (primário, secundário e terciário). Em (Lagonotte et al., 1989) é apresentado um estudo para conseguir uma determinação automática de área e nós pilotos baseada no exame da estrutura de rede, onde são usados conceitos de distância elétrica, teoria da informação, controlabilidade e observabilidade estruturais, este trabalho é uma continuidade da proposta apresentada em (Paul et al., 1987).

Em (Chang et al., 1990) é apresentada uma aplicação para controle ótimo de tensão em tempo real, com base em um fluxo de carga ótimo em tempo real, de modo a remover as violações de tensão e minimizar as perdas de potência ativa na transmissão. O método adota um esquema de prioridade visando a segurança do sistema, tendo como foco remover as violações das

tensões, com a opção da minimização das violações que não podem ser removidas. No trabalho (Bjelogrlic et al., 1990) os autores desenvolveram um esquema hierárquico para controle de tensão e de potência reativa em tempo real, com base no conceito de controle secundário de tensão, tendo sido desenvolvido um procedimento de fluxo de carga sub-ótimo para um conjunto reduzido de variáveis de controle, o qual é fundamentado na teoria de sensibilidade aplicada para a determinação de zona do controle secundário de tensão e correspondente ao conjunto de variáveis de controle. Em 1995, (Salama et al., 1995) desenvolveram um sistema especialista contendo técnicas de habilidade tanto em informação como humana para o controle de potência reativa em sistemas de potência. Enquanto as técnicas de habilidade em informação incluem o método de alocação de capacitores para a máxima redução das perdas de potência ativa, a humana contempla informações para guiar o usuário e para executar o controle de potência reativa nas áreas de planejamento, operação e expansão dos sistemas de distribuição.

O controle secundário de tensão nos sistemas elétricos de potência iniciado no sistema francês (Paul et al., 1987) foi desenvolvido com sucesso e aplicado para reguladores automáticos de tensão (RAT) para melhorar a estabilidade de tensão nos SEPs. Em (Wang, 2001) foram contemplados vários tipos de controladores tais como, RAT, CER e STATCOM para uma nova aplicação: o gerenciamento do perfil de tensão em sistema elétrico com contingência.

Uma abordagem de controle de tensão e de potência reativa baseada no método de pontos interiores modificado é apresentada em (Zhu e Xiong, 2003). No trabalho foi empregado um procedimento em dois passos para o cálculo do suporte de potência reativa usando um processo hierárquico analítico e soluciona o problema de controle ótimo de potência reativa. Os métodos de análise do processo hierárquico analítico e o da sensibilidade são usados para determinar os locais de suporte de potência reativa.

Em (Hu et al., 2003) é apresentada uma estratégia de controle de tensão e de potência reativa para sistemas de distribuição. O objetivo é determinar o despacho ótimo para o ajuste de tap de transformadores em subestações e a conexão de capacitores, com base na previsão de carga. Para reduzir a variação do tap, uma estratégia de controle baseada em intervalo de tempo é

adotada decompondo a carga prevista em diversos níveis sequenciais, sendo que esta divisão em níveis é realizado através de um algoritmo genético. A estratégia proposta minimiza as perdas de potência e melhora o perfil de tensão diário, assegurando que o número de manobras do tap seja menor do que o número máximo previsto diariamente.

Abordagens heurísticas para controle de tensão e de potência reativa podem ser encontradas, por exemplo, em (Yokoyama et al., 1993; Deng et al., 2002), sendo que no primeiro é apresentado um modelo flexível para controle de tensão e de potência reativa com a finalidade de garantir a segurança da tensão. A estratégia de controle é expressa por regras heurísticas que medem a proximidade do estado do sistema a certas condições de operação e fazem uso de equações lineares para obter o modelo de controle efetivo. Em (Deng et al., 2002), foi investigado um método para potência reativa ótima com variação de demanda na carga em sistemas de distribuição. O objetivo foi determinar os ajustes apropriados dos bancos de capacitores e tap de transformadores para as 24 horas do dia seguinte, através de uma abordagem combinada heurística e algorítmica. Esta abordagem simplifica o modelo matemático dos valores de ajustes diários dos dispositivos de controle de tensão por meio de regras heurísticas, e converte o modelo ótimo com variação de carga em um modelo ótimo convencional com carga constante. Deste modo, os algoritmos aplicados ao modelo convencional podem ser usados para solucionar modelos com carga variável.

Outra forma de abordagem é dada pela recente popularidade da inteligência artificial que tem conduzido várias pesquisas a investigarem seu uso para aplicações em sistemas elétricos de potência, como por exemplo a teoria de lógica nebulosa aplicada ao problema de controle de tensão e de potência reativa. Neste sentido, a primeira tentativa para aplicar conceitos nebulosos em análise de decisão em sistemas de potência foi em 1979 (Dhar, 1979). Desde então, conjuntos nebulosos têm sido aplicados a diferentes áreas de análise do sistema elétrico de potência (Momoh e Tomsovic, 1995).

Há alguns anos, conjuntos nebulosos foram usados nos modelos do controle de perfil de tensão e nas funções objetivos do problema de controle de tensão e de potência reativa, e um método de programação linear (PL) foi usado para resolver a formulação baseada em conjuntos

nebulosos (Tomsovic, 1992). O problema do controle de tensão e de potência reativa é de interesse particularmente importante para a área de transmissão de energia elétrica a longas distâncias. O problema prático do controle da tensão consiste em objetivos múltiplos e em restrições flexíveis (modelagem nebulosa). Aplicações baseadas em sistemas especialistas são propostas para incorporar estas considerações práticas. Em (Tomsovic, 1992), os objetivos múltiplos e as restrições flexíveis são modelados usando conjuntos nebulosos e o problema de otimização nebulosa é reformulado como um problema de programação linear sendo que a nova função objetivo representa uma combinação entre os objetivos e as restrições flexíveis. Uma nova abordagem de PL foi aplicada em (Su e Lin, 1999), através de várias funções de pertinência para representar as restrições operacionais sendo que estas funções são definidas de acordo com as violações das magnitudes das tensões nas barras de cargas.

Em (Abdul-Rahman e Shahidehpour, 1993), os autores propuseram uma formulação matemática para o problema de controle ótimo de tensão e de potência reativa usando a teoria de conjuntos nebulosos. Nesta formulação não é necessária a inversão da matriz Jacobiana e a função objetivo e as restrições são modeladas através de conjuntos nebulosos. A formulação do problema ótimo linear nebuloso é feita por meio de funções de pertinência linearizadas. Eles também apresentaram uma outra formulação matemática através de representação nebulosa da carga por meio de declarações lingüísticas. Em situações reais é comum encontrar dados incertos ou mesmo insuficientes para a solução do problema, e por este motivo os autores utilizaram declarações lingüísticas para descrever a validade dos dados.

Um novo modelo de controle de tensão e de potência reativa usando conjuntos nebulosos foi encontrado em (Su e Lin, 1996), com a finalidade de garantir a segurança da tensão. A violação de tensão e a disponibilidade dos dispositivos de controle são traduzidos em notação de conjuntos nebulosos no intuito de refletir a intuição do operador no centro de controle. No controle prático, é possível ajustar os parâmetros usados na definição da função de pertinência para satisfazer as necessidades de operação.

Um novo método de programação linear (PL) foi encontrado em (Venkatesh et al., 1999).

Os autores apresentaram um PL sucessivo nebuloso para o despacho de potência reativa, com o objetivo de minimizar as perdas do sistema e melhorar o perfil de tensão. O método utiliza um modelo de PL nebuloso em uma estrutura de PL sucessivo, determinando um parâmetro de satisfação que define o grau de proximidade entre função objetivo no estado atual e o estado ótimo. Abordagem com PL sucessiva nebulosa ainda pode ser encontrada em (Venkatesh et al., 2000), em continuidade ao trabalho anterior, porém agora com função objetivo múltipla, com a finalidade de minimizar as perdas do sistema e maximizar a margem de estabilidade de tensão, de modo a satisfazer ao máximo as violações de tensão.

Em (Marques et al., 2005), os autores implementaram lógica nebulosa em uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão de operadores para o controle coordenado de tensão. As estratégias de controle são previamente estabelecidas com a participação dos próprios operadores e traduzidas por meio de regras de operação.

Em sistemas de distribuição, encontram-se trabalhos como por exemplo (Lu e Hsu, 1997), o qual apresenta uma abordagem de programação dinâmica nebulosa para resolver o problema de controle de tensão e de potência reativa, tendo como principal finalidade melhorar o nível de tensão na barra secundária do transformador principal e ao mesmo tempo restringir o fluxo de potência reativa no mesmo. Já no trabalho (Liang e Wang, 2003) a principal finalidade foi encontrar a melhor combinação de operação entre ajuste de tap do transformador principal e o chaveamento do banco de capacitores diário, de modo que os desvios de tensão na barra secundária do transformador e nos fluxos de potência ativa e reativa sejam os menores possíveis.

Pesquisas recentes mostram que técnicas baseadas em métodos aproximados, como por exemplo a técnica de otimização *Particle Swarm* (PSO - *Particle Swarm Optimization*), estão sendo aplicados para resolver problemas de controle de tensão e de potência reativa. Em (Yoshida et al., 2000) foi apresentada uma aplicação da técnica de otimização *Particle Swarm* ao problema de controle de tensão e de potência reativa, considerando a avaliação da segurança da tensão em sistema elétricos de potência. A formulação proposta na forma de um problema de otimização não-linear inteiro misto. visou determinar uma estratégia de controle em tempo real,

com variáveis discretas e contínuas, envolvendo reguladores automáticos de tensão, limites operacionais de geradores, posição de tap de transformadores e a quantidade de equipamentos de compensação reativa em cada barra. O método avalia a segurança da tensão através de um fluxo de carga da continuação e técnicas de análise de contingência. Em (Fukuyama e Yoshida, 2001) foi apresentada uma aplicação parcial desta metodologia sem considerar a segurança na tensão. Aplicações baseadas neste mesmo tipo de análise podem ser encontradas em (Mantawy e Al-Ghamdi, 2003; Zhang e Liu, 2004), sendo que neste último foi apresentada uma aplicação em sistemas real.

Uma variação do PSO foi abordada em (Miranda e Fonseca, 2002) para minimizar as perdas em um sistema de distribuição, sendo que o novo modelo foi inspirado nos algoritmos evolucionários e no PSO. O método apresenta características dos dois algoritmos: a troca de informação entre soluções, como no PSO, e a mutação ocorrida na solução é passada para as gerações seguintes pelo mecanismo de seleção encontrados nos algoritmos evolucionário. Outra modificação do PSO pode ser encontrada em (He et al., 2004), apresentando uma técnica melhorada do PSO para resolver problemas de fluxo de potência ótimo. Com a finalidade de prevenir uma convergência pré-matura e desta forma refinar o desempenho de convergência, validada em três diferentes casos: minimização de custos, melhoria no perfil de tensão e aumento da estabilidade de tensão. Ainda em relação às modificações do PSO, no trabalho (Esmín et al., 2005) é proposto um novo modelo, que os autores chamaram de PSO híbrido, para o problema de minimização de perdas de potência no sistema. A ação de controle considerada para reduzir as perdas do sistema foi a instalação de bancos de capacitores. O modelo foi desenvolvido e integrado ao fluxo de carga, dividido em duas etapas: a primeira faz uso da técnica de vetor tangente e identifica a área crítica; a segunda aplica a técnica híbrida do PSO determinando a quantidade ótima de fontes reativas em cada barra.

O PSO também foi aplicado para resolver o problema de controle de tensão e de potência reativa em um sistema de potência com geração eólica (Coath et al., 2004). A geração eólica e outras fontes intermitentes de geração podem dificultar o problema de controle de tensão devido

as restrições físicas e econômicas. A técnica apresentada assegura a integração entre fontes de geração renováveis e fontes de geração convencionais.

Como se pode inferir pelo exposto nesta seção, o controle de tensão e de potência reativa pode ser considerado um dos problemas mais relevantes nos SEP, e diversos métodos podem ser utilizados para resolver este problema. Os métodos propostos neste trabalho de pesquisa, embora tenham os mesmos objetivos dos que foram comentados nesta seção, têm a vantagem da flexibilidade e da fácil implementação, envolvendo baixos requisitos computacionais, tanto em memória como em tempo de processamento.

## Capítulo 3

# Lógica Nebulosa

Este capítulo contempla algumas definições sobre lógica nebulosa, conjuntos nebulosos, funções de pertinência e aplicações de lógica nebulosa em sistemas elétricos de potência.

### 3.1 Lógica Nebulosa

A lógica nebulosa (*fuzzy logic*) é um recurso matemático que suporta os modos de raciocínio que são aproximados ao invés de exatos, ou seja, possibilita modelar de modo aproximado o raciocínio, tentando imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e imprecisão. Derivada do conceito de conjuntos nebulosos (*fuzzy sets*), a lógica nebulosa constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade na implementação e solução de problemas de controle até então intratáveis por técnicas clássicas, por ser uma ferramenta capaz de capturar informações imprecisas, descritas em linguagem natural e convertê-las em formato numérico (Correa, 1999). Ela difere dos sistemas lógicos em suas características e detalhes (El-Harwary, 1998). Na lógica nebulosa, o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas.



Na lógica nebulosa, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto nebuloso de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário dos sistemas lógicos binários, onde o valor verdade só pode assumir dois valores: verdadeiro (1) ou falso (0). Na lógica nebulosa, um valor verdade é expresso lingüisticamente (verdade, muito verdade, não verdade, falso, muito falso), onde cada termo lingüístico é interpretado como um subconjunto nebuloso do intervalo unitário. Pode-se também diferenciar a lógica binária da lógica nebulosa da seguinte forma: enquanto nos sistemas lógicos binários os predicados são exatos (par, ímpar, maior que, menor que), na lógica nebulosa os predicados são nebulosos (alto, baixo). Nos sistemas lógicos clássicos, o modificador mais utilizado é o da negação, enquanto que na lógica nebulosa uma variedade de modificadores de predicados são possíveis (muito, mais ou menos, pouco, etc), os quais são essenciais na geração de termos lingüísticos, tais como: muito alto, mais ou menos perto, etc. Deste modo, a decisão de uma máquina não se resume apenas a um “sim” ou um “não”, mas também tem decisões abstratas, sendo a lógica nebulosa uma técnica inteligente que fornece um mecanismo para manipular informações imprecisas, que permite inferir uma resposta aproximada para uma questão baseada em um conhecimento que é inexato, incompleto ou não totalmente confiável (Zadeh, 1965).

Devido às suas características intrínsecas, a lógica nebulosa é capaz de incorporar tanto o conhecimento objetivo (a partir de dados numéricos) quanto o conhecimento subjetivo (a partir de informações lingüísticas). Para a seguinte questão: “aquele homem é alto ou baixo?” Um sim ou um não como resposta a esta questão é, na maioria das vezes, incompleta. Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem infinitos graus de incerteza. Esta imperfeição intrínseca à informação representada em uma linguagem natural, vinha sendo tratada matematicamente com o uso da teoria das probabilidades (Fellei, 1976) .

O conceito de nebulosidade é freqüentemente confundido com o de probabilidade, a ponto de ter-se uma visão de que conjuntos nebulosos são uma outra forma de abordagem da teoria da probabilidade (El-Harwary, 1998). É fato que a teoria da probabilidade foi a primeira ferramenta a representar incertezas em modelos matemáticos. Contudo, a lógica nebulosa tem se mostrado

mais adequada para tratar de imperfeições da informação do que a teoria da probabilidade. Enquanto a probabilidade, no contexto da lógica clássica, corresponde a um valor numérico ou um intervalo (El-Harwary, 1998), a lógica nebulosa possibilita o emprego de probabilidades lingüísticas (provável, altamente provável, improvável), interpretadas como números nebulosos e manipulados pela aritmética nebulosa. Também em contraste com a lógica modal clássica (Zadeh, 1978), o conceito de possibilidade é interpretado utilizando-se subconjuntos nebulosos no universo dos números reais.

Algumas formas da incerteza não são aleatórias e portanto não são adequadamente modeladas pela teoria da probabilidade. Na verdade, pode-se discutir que a importância predominante da incerteza associada com sistemas complexos é de natureza não aleatória. A teoria de conjuntos nebulosos é uma excelente ferramenta para modelar o tipo de incerteza associado com a intuição, imprecisão, ou falta de informação a respeito de um elemento particular do problema.

De forma mais objetiva, pode-se definir lógica nebulosa como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores de hoje em dia.

O princípio da incompatibilidade estudado por Zadeh (Zadeh, 1973), explica o porquê da necessidade de uma teoria de sistemas nebulosos. O princípio declara, essencialmente, que à medida que a complexidade de um sistema aumenta, reduz-se a habilidade de se fazer indicações precisas e ainda significantes sobre seu comportamento, além de a imprecisão se transformar em característica exclusiva, e isto sugere uma correlação entre complexidade e imprecisão. Aprendendo-se mais sobre um sistema, sua complexidade diminui e a compreensão aumenta. Quando a complexidade diminui, a precisão disposta pelos métodos computacionais torna-se mais útil na modelagem do sistema. Para sistemas menos complexos, que envolvem poucas incertezas, expressões matemáticas oferecem descrições precisas do seu comportamento. Já os sistemas mais complexos necessitam de meios poderosos e eficazes para reduzir alguma incerteza.

A lógica nebulosa é baseada na habilidade em que o cérebro tem para inferir conclusões

e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Devido às suas características intrínsecas, a lógica nebulosa combina conjuntos nebulosos com regras nebulosas para o processamento de informações globalmente complexas e não-lineares, sendo capaz de incorporar tanto o conhecimento subjetivo (a partir de informações lingüísticas) quanto o conhecimento objetivo (a partir de dados numéricos).

De forma mais abrangente pode-se considerar a lógica nebulosa é parte integrante de uma área emergente da pesquisa, denominada *soft computing*, um termo inventado por Zadeh (El-Harwary, 1998). Acredita-se que o fator mais importante que fundamenta o crescimento marcado pela inteligência da máquina (artificial), hoje em dia, é o uso da *soft computing* para imitar a habilidade eficaz da mente humana em empregar particularidades aproximadas que exigem modalidades de raciocínio. Ao contrário da tradicional *hard computing*, cujos principais objetivos são precisão e certeza, *soft computing* tolera imprecisão e incerteza.

Conceitos da teoria de conjuntos nebulosos foram introduzidos primeiramente para resolver problemas de tomada de decisão em sistemas de potência (Dhar, 1979). Entretanto, o interesse substancial de aplicações na área de potência é mais recente (Momoh e Tomsovic, 1995; Bansal, 2003).

## 3.2 Conjuntos Nebulosos

A idéia básica de conjuntos nebulosos está bem fundamentada na teoria desenvolvida por L. A. Zadeh (Zadeh, 1965) que consiste na agregação da precisão inerente ao modelo matemático de conjuntos clássicos com a imprecisão do mundo real.

Um conjunto nebuloso pode ser visto como uma generalização de um conjunto clássico, possibilitando atribuir um grau de pertinência para cada elemento e portanto, a função de pertinência do conjunto nebuloso mapeia cada elemento do universo de discussão a seu espaço

de escala, que na maioria dos casos é assumido como um intervalo fechado  $[0, 1]$ .

A principal diferença entre conjuntos clássicos e conjuntos nebulosos consiste em que o primeiro tem sempre função de pertinência única (exclusiva) enquanto o segundo tem um número infinito de funções de pertinências que o podem representar, permitindo que sistemas nebulosos sejam ajustados para a máxima utilidade em uma dada situação.

Seja um conjunto  $A$  definido sobre um universo  $X$ , o qual é caracterizado pela função de pertinência  $\mu_A(x)$  a qual toma valores no intervalo  $[0, 1]$ . Uma função de pertinência fornece uma medida do grau de similaridade de um elemento em  $X$  ao conjunto nebuloso. Assim,  $A$  é definido como conjunto nebuloso e  $\mu_A(x)$  o grau de pertinência de  $x$  em  $A$ . Quanto mais próximo seja  $\mu_A(x)$  de 1, mais  $x$  pertencerá a  $A$ . É claro que  $A$  pode ser considerado um subconjunto de  $X$  que não tem limites definidos. Tem-se:

$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in X\} \quad (3.1)$$

Quando  $X$  é um conjunto finito (discreto)  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , um conjunto nebuloso sobre  $X$  é expresso como:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots + \mu_A(x_n)/x_n \quad (3.2)$$

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (3.3)$$

Quando  $X$  é um conjunto não-finito (contínuo), o conjunto nebuloso sobre  $X$  é expresso como:

$$A = \int_X \mu_A(x)/x \quad (3.4)$$

Enquanto os conjuntos clássicos indicam se um ponto pertence ou não a um universo preestabelecido, os conjuntos nebulosos trazem uma complementação a este tipo de representação e permitem ampliar as tomadas de decisões, introduzindo qualificadores aos quantificadores, como

por exemplo, “nível de tensão elevado”.

### 3.3 Função de Pertinência

A função de pertinência  $\mu_A(x)$  estabelece a relação entre o elemento  $x$  de um universo  $X$  e o conjunto nebuloso  $A$ . Esta função pode assumir valores que variam de zero à unidade, diferindo da função característica utilizada para definir conjuntos clássicos, a qual só pode assumir os valores unitário ou nulo, onde o elemento pertence ou não ao referido conjunto. Assim, pode-se escrever:

$$\mu_A : X \rightarrow [0 \quad 1]$$

onde a função  $\mu_A$  é responsável pelo mapeamento de  $x \in X$  com relação a  $A$ .

As funções de pertinência podem ser representadas através de vários tipos de funções gráficas: triangular, trapezoidal, exponencial, sinusoidal, entre outras. A escolha do tipo de função depende da aplicação na qual será utilizada, sendo que neste trabalho optou-se pela função de pertinência sinusoidal (forma de sino) (Lima, 2000), descrita no item a seguir.

#### 3.3.1 Função de Pertinência Sinusoidal

A função de pertinência sinusoidal é regida pela equação (3.5) e graficamente mostrada na figura (3.1).

$$A(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-m_A}{\alpha_A}\right)^2} \quad (3.5)$$

A equação também é representada por  $A(m_A, \alpha_A)$ , onde  $m_A$  corresponde ao valor de maior grau ( $A(m_A) = 1$ ) e  $\alpha_A$  é o grau de incerteza da função, sendo  $A(m_A + \alpha_A) = A(m_A - \alpha_A) = 0,5$ .

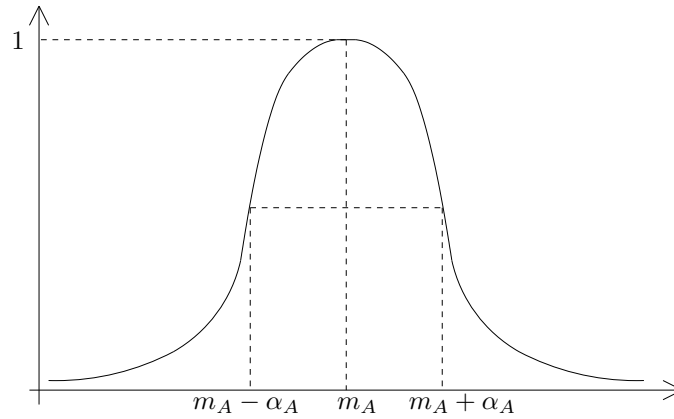


Figura 3.1: Função Sinusoidal

Note que a função sinusoidal possibilita a representação de dados imprecisos somente com um valor principal ( $m_A$ ), e por necessitar de somente dois valores ( $m_A, \alpha_A$ ) para ser definida, esta função tem como característica uma maior facilidade na execução dos cálculos, particularmente no fluxo de carga nebuloso (ver Apêndice A).

### 3.4 Sistemas de Inferência Nebulosa

Os sistemas de inferência nebulosa são métodos de processamento da informação de natureza vaga ou imprecisa, baseados nos conceitos da teoria de conjuntos nebulosos. O sistema de inferência nebulosa é baseado em um conjunto de regras do tipo **se-então**.

**Se**  $x$  é A (antecedente), **então**  $y$  é B (consequente), com  $x$  e  $y$  variáveis numéricas e A e B variáveis lingüísticas, é um exemplo em que as variáveis podem assumir valores lingüísticos tais como, “alta”, “baixa”, etc, definidos por adequados conjuntos nebulosos e respectivas funções de pertinência.

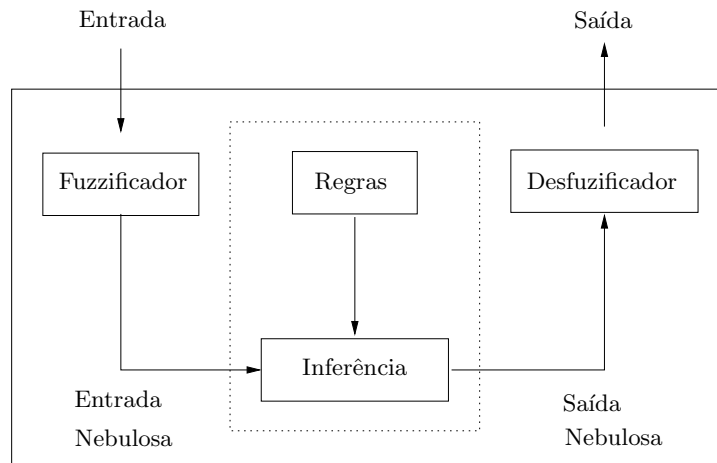


Figura 3.2: Sistema de Inferência Nebulosa

A estrutura geral de um sistema de inferência nebulosa é mostrada na figura 3.2 juntamente com os elementos básicos que compõem esta estrutura, quais sejam (Marques et al., 2005):

- Base de Regras: conjunto de regras do tipo se-então;
- Fuzzificador: determina o grau de pertinência de cada entrada no antecedente da regra;
- Inferência: determina o grau de validade dos conseqüentes das regras e combina os resultados no conjunto nebuloso da saída;
- Desfuzzificador: produz uma saída não nebulosa a partir do conjunto nebuloso definido pelo bloco de inferência.

Para ativar as regras necessita-se de uma entrada adequada às condições pré-determinadas, muitas vezes resultando em condições limitadas quando aplicadas a situações de controle práticas. Uma das razões para esta dificuldade é que os conhecimentos e experiências humanas são frequentemente subjetivos e vagos, tornando difícil as suas representações.

### 3.5 Lógica Nebulosa Aplicada em Sistemas de Elétricos de Potência

A aplicação de lógica nebulosa em SEP começou a ganhar destaque na década de 90 (Tomsovic, 1992), sendo que os conceitos da teoria de conjuntos nebulosos foram introduzidos primeiramente para resolver problemas de tomada de decisão no final da década de 70 (Dhar, 1979).

São muitos os métodos analíticos para a solução de problemas de operação, planejamento e controle em SEP. Entretanto, formulações matemáticas de problemas reais são obtidas sob determinadas suposições e mesmo com estas suposições, as soluções de problemas envolvendo sistemas de grande escala não são triviais. Além disso, muitas incertezas existem em vários problemas de SEP porque os sistemas são grandes, complexos, geograficamente distribuídos, e influenciados por eventos inesperados, sendo que tais fatores podem ser difíceis de serem abordados de maneira eficaz em muitos problemas de SEP somente com formulações matemáticas convencionais. Conseqüentemente, as abordagens nas áreas de inteligência artificial emergiram nos últimos anos em sistemas elétricos de potência para complementar as formulações matemáticas convencionais (Momoh e Tomsovic, 1995).

A seguir são citados alguns exemplos de incertezas e imprecisões em SEP (Song e Johns, 1997):

- Mudanças nas condições de operação dos sistemas elétricos de potência, tais alterações mudanças nas cargas ou na geração, e mudanças na topologia;
- Variações de configuração, como compensação shunt ou série;
- Diferentes condições de distúrbios ou de faltas;
- Imprecisões causadas pela tensão, estimação de estado ou ruídos eletromagnéticos;
- Incertezas provocadas pelo mercado de energia;
- Informações imprecisas fornecidas pelos operadores, envolvendo planejamento, gerenciamento, operação e controle dos sistemas elétricos.



Tais tipos de incertezas colaboraram para o crescimento da aplicação de lógica nebulosa em sistemas elétricos de potência. Atualmente, as abordagens de lógica nebulosa em SEP abrangem diversas áreas (Momoh e Tomsovic, 1995; Srinivasan et al., 1995; Sárfi et al., 1996): avaliação da estabilidade do sistema; análise de fluxo de carga e fluxo de carga ótimo; controle de tensão e de potência reativa (planejamento e operação); planejamento da expansão (curto e longo prazo); identificação de falta e restauração; previsão de carga; entre outras.

## Capítulo 4

# Otimização Particle Swarm

Neste capítulo são apresentados as principais características e algumas definições associadas à técnica de otimização *Particle Swarm*.

### 4.1 Introdução

Problemas de otimização são caracterizados por situações em que se deseja maximizar ou minimizar uma função numérica composta por diversas variáveis, em geral, num contexto em que há restrições. Todas as funções e restrições dependem dos valores assumidos pelas variáveis ao longo do procedimento de otimização.

As técnicas clássicas de otimização são conhecidas há décadas, mas a sofisticação dos recursos computacionais desenvolvidos nos últimos anos, tem motivado avanços significativos nestas técnicas, aliado ao fato de que os problemas estão cada vez mais complexos. Elas são confiáveis mas podem apresentar algumas dificuldades numéricas e problemas de robustez relacionados com a falta de continuidade das funções a serem otimizadas ou de suas restrições; funções não convexas; necessidade de trabalhar com valores discretos das variáveis; existência de mínimos ou máximos locais; etc. Deste modo, o desenvolvimento de métodos heurísticos ou aproximados,

com busca randômica, tem sido uma forte tendência nos últimos anos, principalmente devido aos avanços dos recursos computacionais (Osman, 1991).

Dentre eles, destaca-se a técnica de otimização *particle swarm* (PSO - *Particle Swarm Optimization*) desenvolvida por Kennedy e Eberhart (Kennedy e Eberhart, 1998), a qual, traduzida para o português como otimização por nuvem de partículas ou enxame de partícular, é uma técnica baseada no comportamento social das aves.

PSO é uma técnica que se baseia no comportamento social das aves. A busca por alimento e ou por um lugar para o ninho e também a interação entre os pássaros ao longo do vôo são modelados como um mecanismo de otimização. Fazendo uma analogia, cada pássaro corresponde a uma partícula (ou indivíduo); a área sobrevoada é equivalente ao espaço de busca e encontrar o alimento ou o ninho corresponde a encontrar o ótimo. Ao observar o comportamento do grupo, constatou-se que o bando de pássaros encontra alimento por meio do esforço conjunto e não individualmente, podendo-se inferir que cada informação é compartilhada dentro do grupo, e assim, o comportamento é influenciado pela experiência acumulada por cada pássaro bem como pelo resultado da experiência acumulada pelo grupo (comportamento social).

O PSO é basicamente desenvolvido através da simulação do bando de pássaros (partículas) em um espaço bi-dimensional. O algoritmo possui um vetor de velocidade que define o deslocamento da partícula e outro de posição, sendo que cada partícula modifica sua velocidade levando em conta a melhor posição encontrada por cada partícula (*pbest*) e a melhor posição encontrada pelo grupo (*gbest*). A posição de cada partícula é representada em relação ao eixos XY e a velocidade (vetor deslocamento) é expressa por suas componentes  $vx$  (velocidade no eixo X) e  $vy$  (velocidade no eixo Y). Em resumo, a posição de cada partícula é atualizada de acordo com a velocidade atual, o saber adquirido pela partícula e o saber adquirido pelo bando.

## 4.2 Procedimento de Busca

Os procedimentos de busca desta técnica podem ser descritos assim: uma nuvem de partícula otimiza uma certa função objetivo, cada partícula conhece o seu melhor valor obtido até o momento ( $pbest$ ) e sua melhor posição XY. Além disso, cada partícula conhece o melhor valor do grupo ( $gbest$ ) entre os  $pbest$ , precisamente o melhor valor do grupo até o momento. A velocidade modificada de cada partícula pode ser calculada usando-se a velocidade corrente e a distância entre  $pbest$  e  $gbest$  como mostrado a seguir:

$$v_i^{k+1} = w_i \cdot v_i^k + c_1 \cdot rand \cdot (pbest_i - s_i^k) + c_2 \cdot rand \cdot (gbest - s_i^k) \quad (4.1)$$

onde:

$v_i^k$  é a velocidade corrente da partícula  $i$  na iteração  $k$ ;

$v_i^{k+1}$  é a velocidade modificada da partícula  $i$ ;

$rand$  corresponde a um número aleatório entre 0 e 1;

$s_i^k$  é a posição corrente da partícula  $i$  na iteração  $k$ ;

$pbest_i$  é o melhor valor da partícula  $i$ ;

$gbest$  é o melhor valor do grupo;

$w_i$  função de ponderação (ponderação inercial) da velocidade da partícula  $i$ ;

$c_1$  e  $c_2$  coeficientes de ponderação.

A equação (4.1) permite o cálculo de uma velocidade, de modo que as partículas se aproximem gradualmente de  $pbest$ . A posição corrente (ponto de busca no espaço de soluções) pode ser modificada através da seguinte equação:

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.2)$$

A figura 4.1 mostra o conceito acima apresentado para modificação (atualização) de uma partícula em um espaço de busca bidimensional. Cada partícula modifica sua velocidade levando em conta a melhor posição da partícula e a melhor posição do grupo, além da velocidade corrente da partícula. Variáveis discretas podem ser manipuladas pelas equações (4.1) e (4.2) com pequenas modificações. O cálculo do lado direito da equação (4.1) pode ser discretizado para um número discreto existente, e deste modo é possível tratar números contínuos ou discretos sem nenhuma inconsistência (Fukuyama e Yoshida, 2001).

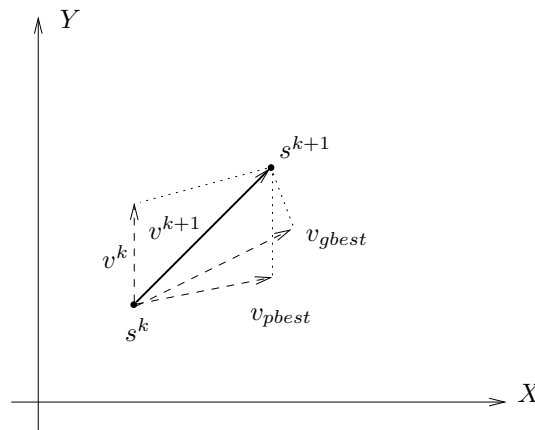


Figura 4.1: Conceito da evolução do ponto de busca

As características deste procedimento de busca são resumidas a seguir (Fukuyama e Yoshida, 2001):

- a) O PSO utiliza vários pontos de busca da mesma forma que um algoritmo genético e os pontos de busca aproximam-se gradualmente do ponto ótimo utilizando seus *pbest* e *gbest*;
- b) Enquanto primeiro termo do lado direito da equação (4.1) corresponde à diversificação no procedimento de busca, o segundo e terceiro termos correspondem a uma intensificação. Isto é, o método possui um mecanismo bem balanceado para uso de diversificação e intensificação de forma eficiente durante o procedimento de busca;
- c) A forma original da técnica de otimização *particle swarm* só pode ser aplicada a problemas

contínuos. Entretanto, o método pode ser facilmente expandido para o problema discreto usando números inteiros para determinação da posição  $XY$  e da velocidade;

- d) Não se gera inconsistência nos procedimentos de busca mesmo que variáveis de estado contínuas e discretas sejam utilizadas com eixos contínuos e pontos coordenados discretos para representação da posição  $XY$  e da velocidade. Isto é, o método pode ser aplicado a um problema de programação inteira não-linear, com variáveis contínuas e discretas de forma fácil e natural;

A característica (b) pode ser explicada do seguinte modo: o lado direito da equação (4.1) consiste de três termos; o primeiro termo corresponde à velocidade prévia da partícula; o segundo e terceiro termos são utilizados para mudar a velocidade da partícula, onde o segundo termo corresponde a parte “cognitiva”, que representa o “conhecimento” da partícula adquirido ao longo dos deslocamentos e a terceira parte é a parte “social”, que representa a colaboração entre as partículas. Sem esses termos, a partícula continuará se deslocando na mesma direção até atingir o limite (fronteira) do espaço de busca. Isto corresponde a explorar novas regiões, com o primeiro termo sendo responsável pela diversificação no processo de busca. Por outro lado, sem o primeiro termo, a velocidade da partícula em deslocamento é determinada somente pelo uso da posição corrente e de suas melhores posições históricas. Isto é, as partículas tenderão a convergir para seus melhores  $pbest$  e/ou  $gbest$ , com o segundo e terceiro termos correspondendo a uma intensificação no processo de busca.

O conceito de *particle swarm* estendido para um problema de programação não-linear inteiro misto (PNLIM) é mostrado na figura 4.2.

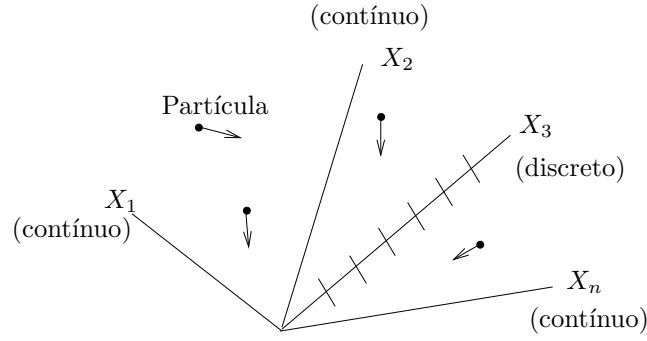


Figura 4.2: Conceito do PSO estendido para representação de um PNLIM

O PSO consiste em a cada passo iterativo, mudar a velocidade de cada partícula, permitindo a busca pelo *pbest* e *gbest*.

As constantes  $c_1$  e  $c_2$  representam as ponderações das partes de “cognição” e “social” que influenciam cada partícula em direção ao *pbest* e ao *gbest*. Estes parâmetros são, usualmente, ajustados por tentativa e erro para valores 0 e 2, sendo também necessário um conhecimento prévio sobre o problema a ser otimizado. O tamanho da população também é selecionado dependendo do problema.

A função de ponderação inercial ( $w$ ) introduz a preferência para a partícula continuar movendo-se na mesma direção que estava seguindo na iteração anterior, sendo que valores elevados de  $w$  facilitam a exploração global enquanto pequenos valores tendem a facilitar a exploração inicial em um valor elevado, promovendo assim a exploração global do espaço de busca, e gradualmente diminuí-lo para refinar a solução. A atualização da função de ponderação é dada pela seguinte equação:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot iter \quad (4.3)$$

sendo:

$iter_{max}$  o número máximo de iterações;

$iter$  o número da iteração atual;

$w$  função de ponderação inercial;

$w_{max}$  e  $w_{min}$  ponderação máxima e mínima respectivamente;

### 4.3 Estrutura Básica do Algoritmo Particle Swarm

O conceito do PSO consiste de, a cada passo iterativo, mudar a velocidade de cada partícula em direção as localizações do  $pbest$  e do  $gbest$ . O procedimento para a implementação do algoritmo particle swarm é regido pelas seguintes etapas (Fukuyama, 2002):

- i. Iniciar uma população de partículas, com posições e velocidades em um espaço de problema  $n$  dimensional, de forma aleatória com distribuição uniforme;
- ii. Para cada partícula, avaliar a função objetivo;
- iii. Comparar a avaliação da função de adequação da partícula com o  $pbest$  da partícula. Se o valor corrente é melhor que o  $pbest$  anterior, então o valor de  $pbest$  passa a ser igual ao valor da função adequação da partícula, e a localização do  $pbest$  passa a ser igual à localização atual;
- iv. Comparar a avaliação da função adequação de cada  $pbest$  com o prévio melhor valor de adequação da população. Se o valor atual é melhor que o  $gbest$  anterior, atualizar o valor de  $gbest$ ;
- v. Modificar a velocidade e a posição da partícula;
- vi. Ir para a etapa (ii) até que o critério de parada seja encontrado. Este critério de parada é, usualmente, dado por um número máximo de iterações, de modo que este número seja grande o suficiente para garantir uma função de adequação de boa qualidade.



Para simplificar o entendimento da estrutura do algoritmo particle swarm usado no trabalho, segue um algoritmo simplificado.

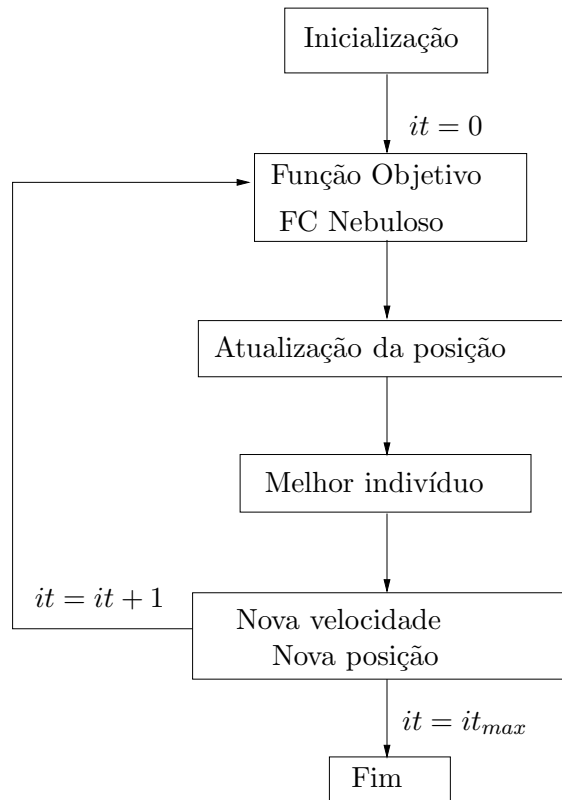


Figura 4.3: Estrutura básica do algoritmo particle swarm

Note que a estrutura do PSO é muito simples, com uma codificação e implantação computacional fáceis (Kennedy e Eberhart, 1998), não requerendo informação referente ao gradiente da função como nos métodos clássicos, além de apresentar baixo custo em termos de memória e tempo de processamento.

## Capítulo 5

# Metodologias Propostas

Assegurar a qualidade e a confiabilidade do suprimento de energia elétrica é um requisito essencial a ser atingido na operação dos sistemas elétricos de potência, visando-se manter as magnitudes das tensões dentro dos seus limites permissíveis. Entretanto no decorrer da operação variações no sistema como mudanças topológicas, alterações nos valores de potências nas cargas ou geração, podem resultar em tensões elevadas ou baixas. Esta situação pode ser melhorada através da realocação de fontes de potência reativa.

Portanto, considerando que grandezas como as magnitudes das tensões e as potências nas barras variam ao longo do dia, pode-se então tratá-las como grandezas nebulosas, diferentemente dos métodos clássicos que as consideram constantes.

A abordagem que utiliza técnicas de lógica nebulosa baseia-se no conhecimento e na experiência de operadores e engenheiros, complementado por estudos de simulação, para estabelecer um sistema de auxílio à decisão de operadores no controle de tensão. A lógica nebulosa pode ser eficientemente aplicada em problemas de controle de tensão e de potência reativa devido à complexidade e à natureza não-linear da relação entre potência reativa e magnitude da tensão (Bansal, 2003).

Assim, neste capítulo são apresentadas as duas metodologias desenvolvidas nesta pesquisa para a monitoração do perfil de tensão, bem como o controle da potência reativa em redes de energia elétrica. A primeira consiste em um algoritmo para o controle de tensão e da potência reativa baseado em regras nebulosas, o qual é a base do sistema de inferência nebulosa, que por sua vez, fundamenta-se na teoria de conjuntos nebulosos. E a segunda metodologia utiliza a técnica de otimização *particle swarm* para tratar como grandezas nebulosas as magnitudes das tensões e as potências na barras, as quais variam ao longo do dia. Com a implementação da técnica de *particle swarm* é possível tratar variáveis contínuas e discretas que são características encontradas no problema de controle de tensão e de potência reativa (Fukuyama e Yoshida, 2001).

## 5.1 Controle de Tensão e de Potência Reativa Baseado em Regras Nebulosas

Nesta metodologia, a estratégia de controle é expressa por regras simples que compõem o sistema de inferência, as quais enfocam os dispositivos de controle e limites operacionais de algumas grandezas que são inseridos em um fluxo de carga nebuloso (ver apêndice A). Estas regras são incorporadas na simulação do fluxo de carga nebuloso do seguinte modo: após a execução de um fluxo de carga nebuloso para uma determinada condição de operação, o resultado é analisado, e ocorrendo por exemplo, violações nas restrições das magnitudes das tensões e/ou das potências reativas, faz-se uso do conjunto de regras para que o ponto de operação resultante da simulação seja o mais próximo possível dos valores nominais, conforme figura 5.1.

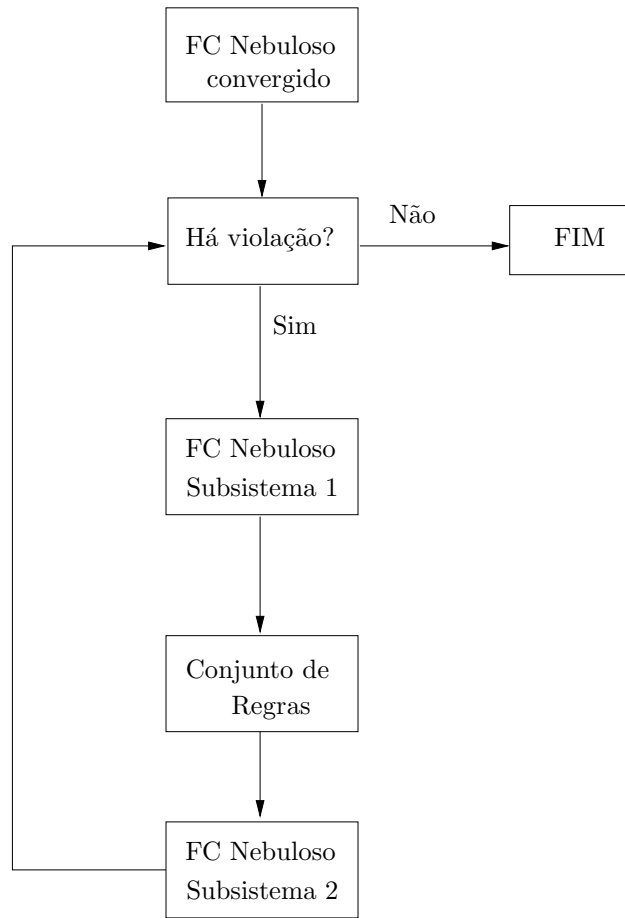


Figura 5.1: Fluxograma Simplificado da Aplicação Baseada em Regras

Considera-se como entrada do sistema de inferência, a composição de duas funções de pertinência, de modo que estas representem a relação entre a magnitude da tensão e a potência reativa. Esta relação é exemplificada na figura 5.2.

A figura 5.2(a) representa a magnitude da tensão como uma das entradas do sistema de inferência, para este exemplo, as regiões hachuradas representam as possíveis violação das magnitudes das tensões, que poderá ser uma violação do limite superior ou inferior (a direita de  $V_{max}$  representa a violação do limite superior e a esquerda de  $V_{min}$  representa a violação do limite inferior). A figura 5.2(b) representa a outra entrada do sistema de inferência, que para o exemplo será a potência reativa, que neste caso apresenta valores dentro dos valores aceitáveis.

Assim, dependendo do tipo de violação da magnitude da tensão (superior ou inferior), atuará o dispositivo de controle adequado. Esta ação de controle permite que a magnitude da tensão retorne à sua faixa de valores permitidos, como mostrado na figura 5.2(c).

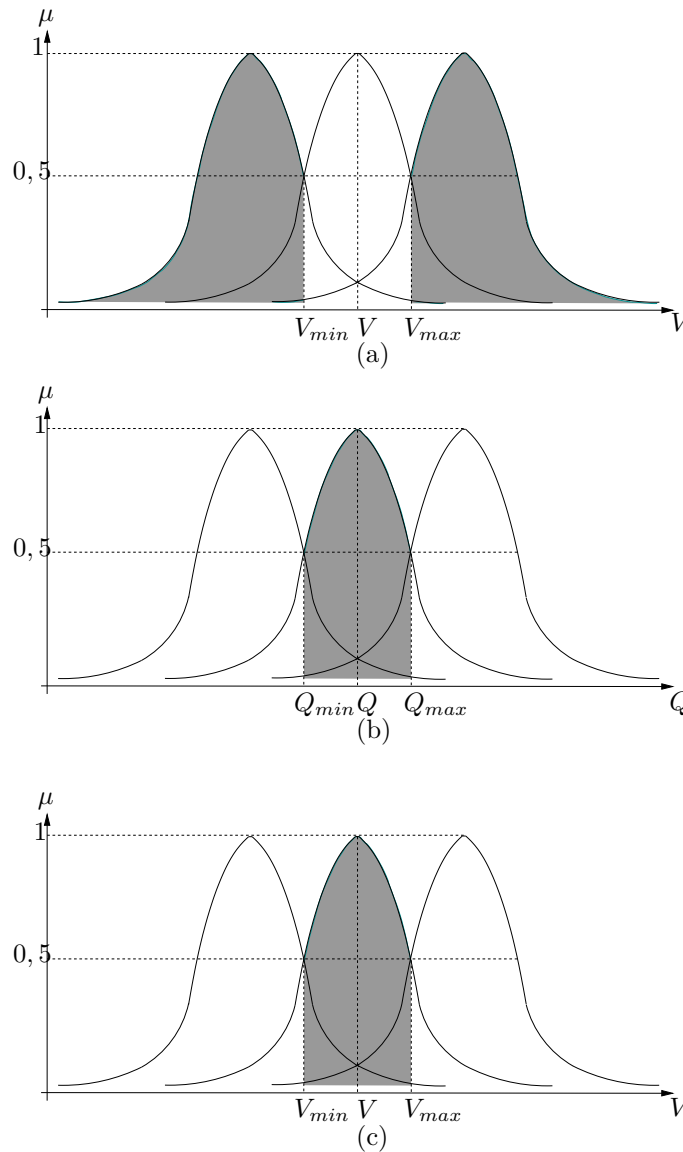


Figura 5.2: Exemplo Completo do Sistema de Inferência

As regras são elaboradas e aplicadas segundo os objetivos a serem atingidos na operação de cada rede de energia elétrica. Como neste trabalho o objetivo foi o controle da magnitude da tensão e da potência reativa, foram elaboradas regras adequadas para este propósito.

A seguir, são listadas as regras utilizadas nesta aplicação:

**R1:** Se na barra  $k$ :

$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$  e  $Q_k - \alpha_{Q_k} > Qmin_k$  ou  $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$  e  $Q_k + \alpha_{Q_k} < Qmax_k$ , ou  
 $V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$  e  $TAP_k - \alpha_{TAP_k} > TAPmin_k$  ou  $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$  e  $TAP_k + \alpha_{TAP_k} < TAPmax_k$ , **então** realizar o controle da tensão através da injeção de potência reativa na barra;

**R2:** Se na barra  $k$ :

$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$  e  $Q_k = Qmin_k$  ou  $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$  e  $Q_k = Qmax_k$ ,  
 e há na vizinhança um condensador síncrono que pode eliminar a violação através da injeção de reativos, **então** realizar o controle;

**R3:** Se na barra  $k$ :

$Q_k - \alpha_{Q_k} < Qmin_k$  e  $V_k + \alpha_{V_k} < Vmax_k$  ou  $Q_k + \alpha_{Q_k} > Qmax_k$  e  $V_k - \alpha_{V_k} > Vmin_k$   
**então** controlar o suporte de potência reativa na barra  $k$ ;

**R4:** Se na barra  $k$ :

$V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ , **então** realizar controle da tensão através de bancos de capacitores ou desligar banco de indutores quando existir na própria barra ou vizinhança;

**R5:** Se na barra  $k$ :

$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ , **então** realizar controle da tensão através de bancos de indutores ou desligar banco de capacitores quando existir na própria barra ou vizinhança;

**R6:** Se na barra  $k$ :

$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$  ou  $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$  e havendo tap disponível que viabilize o controle, **então** realizar o controle independentemente da existência ou não de controles disponíveis;

As regras são aplicadas conforme a necessidade e operação do sistema. Após a análise do estado da rede para uma determinada condição de operação, a escolha do controle pode ocorrer

de duas maneiras: através de uma análise de sensibilidade ou impondo a atuação de controles específicos considerando a experiência e o conhecimento do operador.

Aplicada uma regra verifica-se os fluxos de potência ativa e reativa e as magnitudes das tensões nas barras, identificando possíveis fluxos de potências elevados e se as restrições das tensões foram atendidas. Em casos de fluxos de potências elevados e tensões ainda violadas, verifica-se a possibilidade de atuação de outra regra que possa aliviar os fluxos nos ramos e controlar o perfil de tensão. De forma análoga, se os fluxos de potências estiverem em valores aceitáveis, executa-se a regra que melhor atender a condição de violação da tensão.

A seguir, tem-se algumas características que podem ser observadas nesta aplicação:

- Os controles dos dispositivos para ajuste da magnitude da tensão e da potência reativa são alterados de modo que o perfil de tensão resultante esteja tão próximo quanto possível da condição desejada;
- A operação dos dispositivos de controle da magnitude da tensão e da potência reativa é realizada usando regras nebulosas aproximando-se dos conhecimentos e experiências dos operadores;
- A adaptabilidade das regras é medida pelas funções de pertinência, contribuindo qualitativamente para a compreensão do processo de inferência pelo operador.

## 5.2 Utilização dos Dispositivos de Controle

Geralmente as concessionária de energia estabelecem uma política de utilização dos controles através dos custos operacionais e de manutenção. Se considerarmos que para a especificação dos custos associados, comparando o uso de capacitores *shunt* com taps de transformadores como controles, o custo da aplicação do chaveamento de capacitor deve ser maior, pois os disjuntores de capacitor *shunt*, após um determinado número de manobras devem passar por uma revisão

completa, inclusive realizada pelo próprio fabricante do disjuntor. O mesmo não acontece com o LTC. Estes também recebem manutenção preventiva periódica, mas raramente apresentam defeitos ou necessitam de revisão.

Assim, vale ressaltar que na metodologia apresentada não houve a preocupação quanto a minimização dos custos, uma vez que as regras que prevêm o uso de LTC foram as últimas a serem apresentadas. A justificativa principal para este fato se deve a flexibilidade do método, as regras não serão necessariamente aplicadas na ordem apresentada. Como comentado anteriormente, a abordagem que utiliza lógica nebulosa envolve principalmente o conhecimento e experiência técnica, de modo que as regras serão aplicadas de acordo com a operação e necessidade da rede de energia elétrica.

### **5.3 Controle de Tensão e de Potência Reativa Utilizando Lógica Nebulosa e Particle Swarm**

Para exemplificar a metodologia, optou-se por ter como função objetivo a minimização das perdas ativas do sistema:

$$\text{Min } f_{x,y} = \sum \text{Perdas}_{\text{totais}} \quad (5.1)$$

sujeito a

$$P_g - P_c - P_{\text{calc}} = 0$$

$$Q_g - Q_c - Q_{\text{calc}} = 0$$

$$V_{g_{\min}} \leq V_g \leq V_{g_{\max}}$$

$$V_{c_{\min}} \leq V_c \leq V_{c_{\max}}$$

$$\text{tap}_{\min} \leq \text{tap} \leq \text{tap}_{\max}$$

$$0 \leq Q_{sh} \leq 3 \cdot Q_{sh}$$



onde:  $x$  representa as variáveis contínuas;  $y$  representa as variáveis discretas; as perdas totais de potência ativa, tensão nas barras de geração e de cargas são representadas por  $Perdas_{totais}$ ,  $V_g$  e  $V_c$ , respectivamente, e  $tap$  é a representação da posição do tap de transformador.

As perdas ativas do sistema são calculadas usando a solução de um fluxo de carga nebuloso com variáveis contínuas e discretas. As violações das restrições são verificadas durante os cálculos do fluxo de carga nebuloso, para o qual os dados das potências ativa e reativa são representados através de uma função de pertinência, no caso a função de pertinência sinusoidal, exemplificada na figura 5.3.

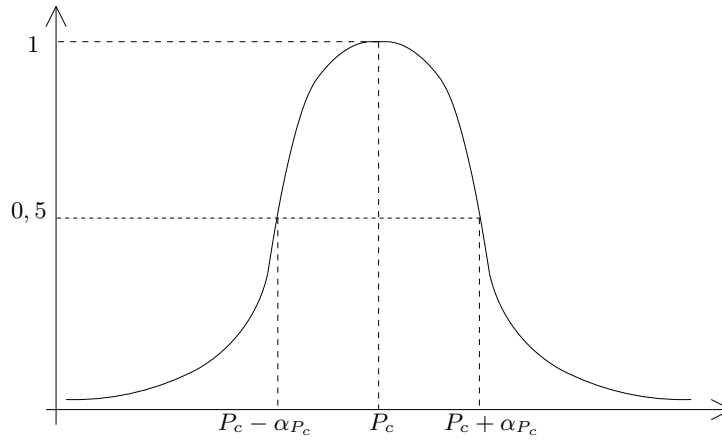


Figura 5.3: Representação da função de pertinência sinusoidal

Obs:  $\alpha_{P_c}$  representa o desvio ou a imprecisão da potência ativa na carga, sendo válido para todas as potências ativa e reativas.

Cada variável é tratada pelo particle swarm da seguinte forma: pontos iniciais de operação das tensões nas barras de geração são gerados aleatoriamente na faixa definida pelas tensões máximas e mínimas de operação. Durante o processo de busca esses valores também variam respeitando essa faixa. As posições dos taps também são geradas aleatoriamente no interior da faixa de excursão dos taps e durante a busca, tais posições são variadas respeitando-se as posições de tap existentes. O número de equipamentos de controle de tensão inicialmente em operação também é gerado aleatoriamente, entre 0 e o número de equipamentos existente em cada barra.

Durante a busca, a variação desse número se dá respeitando a quantidade de equipamentos de controle existente em cada barra.

O procedimento para a implementação do algoritmo *particle swarm* pode ser descrito do seguinte modo:

- i. Os pontos iniciais de busca e velocidades das partículas são gerados aleatoriamente, como citado anteriormente; a velocidade inicial é zero e os pontos iniciais de busca são: tensão de geração, potência reativa gerada, tap de transformadores e equipamentos de compensação reativa ;
- ii. As perdas ativas associadas a cada partícula são calculadas para cada ponto de busca através de um cálculo de fluxo de carga nebuloso;
- iii. Comparar a avaliação da função objetivo com o *pbest* da partícula (ou melhor, das grandezas citadas no item i). Se o valor corrente é melhor que o *pbest* anterior, então o valor de *pbest* é atualizado, e a localização do *pbest* passa a ser igual à localização atual, e o melhor *pbest* é tomado como *gbest*;
- iv. Comparar cada *gbest* com o anteriores. Se o valor atual é melhor que o *gbest* anterior, atualizar o valor de *gbest*;
- v. Modificar a velocidade e a posição da partícula;
- vi. Ir para a etapa (ii) até que o critério de parada seja encontrado. Este critério de parada é, usualmente, dado por um número máximo de iterações, de modo que este número seja grande o suficiente para garantir uma função objetivo de boa qualidade.

O número máximo de iterações deve ser suficiente para garantir uma solução de boa qualidade, sendo que estudos anteriores apontam que o algoritmo *particle swarm* requer menos de 100 iterações, mesmo para problemas de larga escala (Fukuyama, 2002).

## 5.4 Comentários Gerais

Neste capítulo foram descritas as duas metodologias distintas propostas neste trabalho, sendo que uma delas realiza o controle de tensão e de potência reativa através de ações de controle executadas através de um conjunto de regras nebulosas, sendo necessário ter um bom conhecimento da rede, pois as aplicações das regras serão mais eficientes, devido à possibilidade de ocorrer incompatibilidade entre dispositivos controles e o processo de controle de tensão não convergir para uma solução de boa qualidade. Por outro lado a segunda metodologia faz uso da técnica de otimização *particle swarm* com o objetivo de minimizar as perdas dos sistema, sendo que os dispositivos de controle são ajustados simultaneamente dentro do processo iterativo. Detalhe: ambos os métodos requerem um fluxo de carga nebuloso.

## Capítulo 6

# Testes e Resultados

Através dos resultados de algumas simulações em diferentes redes de energia elétrica, neste capítulo é avaliado o desempenho das metodologias desenvolvidas nesta pesquisa.

### 6.1 Metodologia A:

#### Controle de Tensão e de Potência Reativa Baseado em Regras Nebulosas

Esta metodologia foi avaliada através das seguintes redes de energia elétricas: sistemas testes IEEE-14 e IEEE-30 barras (<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>) e uma rede real com 216 barras existente na região de Campinas, as descrições deste sistema encontram-se no apêndice B.

A utilização do sistema IEEE-14 teve como principal objetivo comprovar a eficiência do método proposto, sob o ponto de vista de atuação e interação de diferentes controles, e devido ao fato deste sistema ser pequeno, foi possível utilizar a maior parte as regras, uma vez que alterações significativas em algum controle pode alterar o estado  $(V, \theta)$  de praticamente toda a

rede elétrica.

Nas simulações realizadas considerou-se como limites operacionais das magnitudes das tensões uma variação de até  $\pm 3\%$  sobre o valor nominal ou valor especificado tanto para as barras de carga como para as de geração.

### 6.1.1 Sistema IEEE-14 barras

Para este sistema estão disponíveis os seguintes controles: geradores síncronos nas barras 2, 3, 6 e 8; tap de transformadores entre os ramos 4-7, 4-9 e 5-6, e banco de capacitores na barra 9.

A tabela 6.1 contém os valores dos limites operacionais das magnitudes das tensões e das potências reativas nas barras de geração para o sistema teste IEEE-14 barras.

Tabela 6.1: Limites operacionais - IEEE-14 barras

Barra	V (pu)		$Q_G$ (MVA)	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
2	1,010	1,072	-40,0	50,0
3	0,980	1,040	0,0	40,0
6	1,038	1,120	-6,0	24,0
8	1,037	1,123	-6,0	24,0

Para as barras de adotou-se  $0,97 < V_c < 1,03$  pu.

A tabela 6.2 apresenta o estado da rede e a geração de potência reativa para o caso base, ou seja, sem atuação de qualquer tipo de controle, considerando a rede em um ponto de operação com 25% de sobrecarga. Esta rede não apresenta nenhum tipo de violação se considerarmos os dados fornecidos pelo banco de dados, sendo necessário criar uma situação de violação para verificar o desempenho do método.

A partir dos valores mostrados na tabela 6.2, verifica-se que há violação nos valores (limite superior) das potências reativas das barras de geração, com exceção da barra 8. E em algumas

barras de carga (7, 9, 10, 11, 13 e 12) há violação do limite superior da magnitude da tensão.

Tabela 6.2: Estado da rede - caso base (IEEE-14 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,060	0,00000	0,00	-18,03	1,5648
<b>2</b>	<b>1,041</b>	0,00000	<b>-6,65</b>	<b>58,41</b>	<b>5,2688</b>
<b>3</b>	<b>1,010</b>	0,00000	<b>-16,65</b>	<b>47,65</b>	<b>3,1496</b>
4	1,008	0,00312	-13,37	-	-
5	1,010	0,00290	-11,41	-	-
<b>6</b>	<b>1,070</b>	0,00000	<b>-18,40</b>	<b>26,67</b>	<b>2,4011</b>
<b>7</b>	<b>1,053</b>	<b>0,00295</b>	<b>-17,21</b>	-	-
8	1,090	0,00000	-17,21	22,96	1,0461
<b>9</b>	<b>1,043</b>	<b>0,00440</b>	<b>-19,20</b>	-	-
<b>10</b>	<b>1,039</b>	<b>0,00432</b>	<b>-19,42</b>	-	-
<b>11</b>	<b>1,050</b>	<b>0,00252</b>	<b>-19,07</b>	-	-
<b>12</b>	<b>1,054</b>	<b>0,00160</b>	<b>-19,48</b>	-	-
<b>13</b>	<b>1,044</b>	<b>0,00227</b>	<b>-19,56</b>	-	-
14	1,021	0,00521	-20,64	-	-

Tendo-se como objetivo atender aos limites operacionais das magnitudes das tensões e das potências reativas, foram aplicadas as regras R1, R2, R6 e R3 respectivamente.

Tabela 6.3: Regras Utilizadas

Regras	Descrição	Ação de controle
	Se	Então
R1	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ e $Q_k - \alpha_{Q_k} > Qmin_k$ ou $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e $Q_k + \alpha_{Q_k} < Qmax_k$ ou $V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ e $TAP_k - \alpha_{TAP_k} > TAPmin_k$ ou $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e $TAP_k + \alpha_{TAP_k} < TAPmax_k$	realizar o controle da tensão através da injeção de potência reativa na barra
R2	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ e $Q_k = Qmin_k$ $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e $Q_k = Qmax_k$ e há na vizinhança um condensador síncrono que pode eliminar a violação através da injeção de reativos	realizar o controle
R3	$Q_k - \alpha_{Q_k} < Qmin_k$ e $V_k + \alpha_{V_k} < Vmax_k$ ou $Q_k + \alpha_{Q_k} > Qmax_k$ e $V_k - \alpha_{V_k} > Vmin_k$	controlar o suporte de potência reativa na barra $k$
R6	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ ou $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e havendo tap disponível que viabilize o controle	realizar o controle independentemente da existência ou não de controles disponíveis

A R1 foi aplicada para corrigir as tensões nas barras de carga que estavam violadas, porém o controle não foi suficiente, uma vez que as tensões ficaram fixadas no limite superior (1,030 pu) como mostra a tabela 6.4, levando em consideração o pior caso ( $V + \alpha_V$ ), estas tensão continuam violando o limite superior da magnitude da tensão. Assim, aplica-se a R2 (tabela 6.5) para o condensador síncrono presente na barra 8, que pertencem à vizinhança das barras 7 e 9, respectivamente, sendo que uma análise de sensibilidade determinou o ajuste deste condensador síncrono, este controle melhora o perfil de tensão na barra 10, mas ainda não permite que este fique dentro dos limites aceitáveis considerando-se  $V + \alpha_V$ . Já para as barras 11, 12 e 13 foi aplicada a regra R6, como mostra a tabela 6.6.

Tabela 6.4: Resultados após o controle - regra R1 (IEEE-14 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
7	1,030	0,00295	-17,20	-	-
9	1,030	0,00440	-19,23	-	-
10	1,030	0,00432	-19,52	-	-
11	1,030	0,00252	-18,84	-	-
12	1,030	0,00160	-19,08	-	-
13	1,030	0,00227	-19,47	-	-

Tabela 6.5: Resultados após o controle - regra R2 (IEEE-14 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
7	1,025	0,00296	-17,19	-	-
9	1,026	0,00392	-19,19	-	-
10	1,028	0,00435	-19,41	-	-

Tabela 6.6: Resultados após o controle - regra R6 (IEEE-14 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
10	1,025	0,00426	-19,40	-	-
11	1,027	0,00253	-19,05	-	-
12	1,026	0,00160	-19,48	-	-
13	1,028	0,00227	-19,56	-	-

E finalmente, a regra R3 possibilitou corrigir a violação da geração de potência reativa nas barras 2, 3 e 6, conforme tabela 6.7.

Tabela 6.7: Resultados após o controle - regra R3 (IEEE-14 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
2	1,029	0,00000	-6,52	46,78	2,2588
3	0,987	0,00000	-16,68	38,17	1,8513
6	1,047	0,00000	-18,59	22,46	1,6811

A tabela 6.8 apresenta o estado da rede após a aplicação das regras, onde as violações foram eliminadas.

Tabela 6.8: Estado da rede - final (IEEE-14 Barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,060	0,00000	0,00	-15,88	1,5710
2	1,029	0,00000	-6,52	46,78	2,558
3	0,987	0,00000	-16,68	38,17	1,8513
4	0,992	0,00312	-13,35	-	-
5	1,005	0,00290	-11,37	-	-
6	1,047	0,00000	-18,59	22,46	1,6811
7	1,025	0,00296	-17,19	-	-
8	1,080	0,00000	-17,19	22,34	1,1791
9	1,026	0,00392	-19,19	-	-
10	1,025	0,00426	-19,40	-	-
11	1,027	0,00253	-19,05	-	-
12	1,026	0,00160	-19,48	-	-
13	1,028	0,00227	-19,56	-	-
14	1,014	0,00525	-20,64	-	-

### 6.1.2 IEEE-30 barras

Para este sistema estão disponíveis os seguintes controles: geradores síncronos nas barras 2, 3, 8, 11 e 13; tap de transformadores entre os ramos 6-9 , 6-10 e 4-12, e banco de capacitores nas barras 10 e 24.

A tabela 6.9 apresenta os limites operacionais das magnitudes das tensões e das potências reativas nas barras de geração para o sistema teste IEEE-30 barras.



Tabela 6.9: Limites Operacionais - IEEE-30 barras

Bus	V (pu)			$Q_G$ (MVA)	
	Limite inferior	Tensão nominal	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
2	1,014	1,045	1,076	-40,0	50,0
5	0,980	1,010	1,040	-40,0	40,0
8	0,980	1,010	1,040	-10,0	40,0
11	1,050	1,082	1,114	-6,0	24,0
13	1,038	1,071	1,103	-6,0	24,0

Para as barras de adotou-se  $0,97 < V_c < 1,03$  pu.

A tabela 6.10 representa o estado da rede para o caso base, bem como sua geração de potência reativa, ou seja, sem a atuação de qualquer tipo de controle. Neste sistema observa-se violação de potência reativa gerada (barra 2) e 9 violações de tensão nas seguintes barras: 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 21 e 22, como destacado na tabela 6.10.

Tabela 6.10: Estado da rede - base case (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,060	0,00000	0,00	-20,38	1,4266
<b>2</b>	<b>1,045</b>	0,00000	<b>-5,53</b>	<b>57,07</b>	<b>3,9949</b>
3	1,021	0,00186	-7,99	-	-
4	1,012	0,00201	-9,64	-	-
5	1,010	0,00000	-14,38	35,66	2,4962
6	1,011	0,00150	-1125	-	-
7	1,003	0,00154	-13,13	-	-
8	1,010	0,00000	-12,92	36,17	2,5319
<b>9</b>	<b>1,051</b>	<b>0,00244</b>	<b>-14,42</b>	-	-
<b>10</b>	<b>1,045</b>	<b>0,00403</b>	<b>-16,01</b>	-	-
11	1,082	0,00000	-14,42	16,07	1,1249
<b>12</b>	<b>1,057</b>	<b>0,00257</b>	<b>-15,28</b>	-	-
13	1,071	0,00000	-15,28	10,34	0,7238
<b>14</b>	<b>1,043</b>	<b>0,00376</b>	<b>-16,17</b>	-	-
<b>15</b>	<b>1,038</b>	<b>0,00419</b>	<b>-16,26</b>	-	-
<b>16</b>	<b>1,045</b>	<b>0,00372</b>	<b>-15,86</b>	-	-
<b>17</b>	<b>1,040</b>	<b>0,00433</b>	<b>-16,17</b>	-	-
18	1,028	0,00106	-16,86	-	-
19	1,026	0,00233	-17,03	-	-

continuação, página seguinte...

Continuação - Estado da rede - base case (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
20	1,028	0,00107	-16,84	-	-
<b>21</b>	<b>1,033</b>	<b>0,00497</b>	<b>-16,45</b>	-	-
<b>22</b>	<b>1,033</b>	<b>0,00494</b>	<b>-16,44</b>	-	-
23	1,027	0,00217	-16,64	-	-
24	1,022	0,00584	-16,81	-	-
25	1,018	0,00533	-16,38	-	-
26	1,000	0,00668	-16,80	-	-
27	1,023	0,00434	-15,85	-	-
28	1,007	0,00169	-11,99	-	-
29	1,004	0,00590	-17,08	-	-
30	0,992	0,00679	-17,96	-	-

No contexto de atender aos limites operacionais das magnitudes das tensões e potência reativa, foi aplicada as regras R2, R6 e R3, respectivamente (ver tabela 6.11). A regra R2 foi aplicada para os condensadores síncronos nas barras 11 e 13, os quais pertencem a vizinhança das barras 9 e 12, respectivamente. Uma análise de sensibilidade determinou os ajustes destes condensadores síncronos. Entretanto, para as barras 9 e 12 a regra R6 também foi aplicada, porque o controle através da regra R2 mostrou-se insuficiente para atender os as violações das magnitudes das tensões nestas barras, conforme exposto na tabela 6.12, onde é possível verificar a correção da violação da magnitude da tensão na barra 15.

Tabela 6.11: Regras Utilizadas

Regras	Descrição	Ação de controle
	Se	Então
R2	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ e $Q_k = Qmin_k$ $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e $Q_k = Qmax_k$ e há na vizinhança um condensador síncrono que pode eliminar a violação através da injeção de reativos	realizar o controle
R3	$Q_k - \alpha_{Q_k} < Qmin_k$ e $V_k + \alpha_{V_k} < Vmax_k$ ou $Q_k + \alpha_{Q_k} > Qmax_k$ e $V_k - \alpha_{V_k} > Vmin_k$	controlar o suporte de potência reativa na barra $k$
R6	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ ou $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e havendo tap disponível que viabilize o controle	realizar o controle independentemente da existência ou não de controles disponíveis

A aplicação da regra R6 possibilitou a correção das violações das magnitudes das tensões nas barras 9 e 12, e ainda as violações nas barras de carga 10 e 14 , conforme tabela 6.13.

Tabela 6.12: Resultados após regra R2 (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
9	1,044	0,00242	-14,44	-	-
10	1,038	0,00400	-16,06	-	-
11	1,050	0,00000	-14,44	15,91	1,1137
12	1,047	0,00251	-15,26	-	-
13	1,038	0,00000	-15,26	6,07	0,4249
14	1,033	0,00372	-16,16	-	-
15	1,018	0,00411	-16,33	-	-
16	1,036	0,00369	-15,88	-	-
17	1,032	0,00430	-16,21	-	-
21	1,029	0,00495	-16,50	-	-
22	1,030	0,00492	-16,49	-	-

Tabela 6.13: Resultados após regra R6 (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
9	1,023	0,00237	-14,69	-	-
10	1,021	0,00393	-16,36	-	-
12	1,028	0,00246	-15,76	-	-
14	1,014	0,00365	-16,68	-	-
15	1,018	0,00411	-16,33	-	-
16	1,018	0,00416	-15,93	-	-
17	1,015	0,00539	-16,27	-	-
21	1,025	0,00493	-15,93	-	-
22	1,025	0,00489	-16,27	-	-

E finalmente, a regra R3 utilizada para corrigir as violação de geração de potência reativa na barra 2 ( $Q_{G_2} = 46,5$  MVA ,  $\alpha_{Q_{G_2}} = 3,5$  MVar and  $V_2 = 1,042$  pu).

A tabela 6.14 apresenta o estado final da rede IEEE-30 barras após a eliminação, através das regras, de todas as violações existentes.

Tabela 6.14: Estado da rede - final (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,060	0,00000	0,00	-16,11	1,1277
2	1,042	0,00000	-5,50	46,50	3,5
3	1,020	0,00186	-7,99	-	-
4	1,011	0,00201	-9,62	-	-
5	1,010	0,00000	-14,39	36,07	2,5249
6	1,010	0,00150	-11,37	-	-
7	1,002	0,00154	-13,14	-	-
8	1,010	0,00000	-12,12	37,16	2,6012
9	1,023	0,00237	-14,69	-	-
10	1,021	0,00392	-16,36	-	-
11	1,080	0,00000	-14,46	15,91	1,1137
12	1,050	0,00246	-15,26	-	-
13	1,058	0,00000	-15,26	6,07	0,4249
14	1,014	0,00365	-16,16	-	-
15	1,018	0,00411	-16,26	-	-
16	1,018	0,00416	-15,88	-	-
17	1,015	0,00439	-16,21	-	-
18	1,023	0,00503	-16,89	-	-
19	1,021	0,00533	-17,07	-	-
20	1,025	0,00507	-16,88	-	-
21	1,029	0,00493	-16,50	-	-
22	1,030	0,00489	-16,49	-	-
23	1,022	0,00217	-16,66	-	-
24	1,018	0,00584	-16,85	-	-
25	1,015	0,00533	-16,42	-	-
26	0,997	0,00668	-16,84	-	-
27	1,021	0,00434	-15,89	-	-
28	1,006	0,00169	-11,99	-	-
29	1,001	0,00590	-17,13	-	-
30	0,990	0,00679	-18,01	-	-

Considerando que as cargas variam conforme a operação do sistema, uma outra simulação foi realizada considerando um ponto de operação onde há redução, em relação ao caso base, de 10% nas cargas localizadas entre as barras 9 e 30 com exceção da barra 28. Esta escolha se justifica devido ao fato destas barras pertencerem ao circuito de baixa tensão da rede. Nesta simulação há violação de potência reativa gerada na barra 2 e violação do limite superior das magnitudes das tensão nas barras destacadas na tabela 6.15.

Tabela 6.15: Estado da rede - redução de carga (IEEE-30 barras)

Bus	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,060	0,00000	0,00	-19,09	1,4266
<b>2</b>	<b>1,045</b>	0,00000	<b>-5,28</b>	<b>53,29</b>	<b>3,9949</b>
3	1,023	0,00186	-7,58	-	-
4	1,014	0,00201	-9,15	-	-
5	1,010	0,00000	-13,96	34,88	2,4962
6	1,012	0,00150	-10,81	-	-
7	1,003	0,00154	-12,63	-	-
8	1,010	0,00000	-11,51	31,52	2,5319
<b>9</b>	<b>1,054</b>	0,00244	<b>-13,53</b>	-	-
<b>10</b>	<b>1,050</b>	0,00403	<b>-14,94</b>	-	-
11	1,082	0,00000	-13,53	14,50	1,1249
<b>12</b>	<b>1,061</b>	0,00257	<b>-14,23</b>	-	-
13	1,071	0,00000	-14,23	7,83	0,7238
<b>14</b>	<b>1,048</b>	0,00376	<b>-15,03</b>	-	-
<b>15</b>	<b>1,043</b>	0,00419	<b>-15,12</b>	-	-
<b>16</b>	<b>1,050</b>	0,00372	<b>-14,78</b>	-	-
<b>17</b>	<b>1,045</b>	0,00433	<b>-15,08</b>	-	-
<b>18</b>	<b>1,035</b>	0,00106	<b>-15,68</b>	-	-
<b>19</b>	<b>1,033</b>	0,00233	<b>-15,83</b>	-	-
<b>20</b>	<b>1,037</b>	0,00107	<b>-16,66</b>	-	-
<b>21</b>	<b>1,039</b>	0,00497	<b>-15,34</b>	-	-
<b>22</b>	<b>1,040</b>	0,00494	<b>-15,33</b>	-	-
<b>23</b>	<b>1,034</b>	0,00217	<b>-15,48</b>	-	-
24	1,029	0,00584	-15,66	-	-
25	1,024	0,00533	-15,26	-	-
26	1,009	0,00668	-15,64	-	-
27	1,029	0,00434	-14,79	-	-
28	1,009	0,00169	-11,38	-	-
29	1,011	0,00590	-15,88	-	-
30	1,001	0,00679	-16,66	-	-

Para este ponto de operação utilizou as seguintes regras para corrigir as violações de magnitudes da tensão e geração de potência reativa existentes: R2, R6 e R3, respectivamente. A regra R2 foi usada para controlar as magnitudes da tensão nas barras 9 e 12, através do condensador síncrono na barra 11 e 13, respectivamente. Este controle não foi suficiente para corrigir a violação das magnitudes das tensões nas barras 9 e 12, devido ao fato das magnitudes das tensões nas barras dos condensadores alcançarem seus limites inferiores e ainda existir violação

de magnitude da tensão nas barras 9 e 12. Entretanto, a ação da regra R2 permitiu a correção de magnitudes de tensão na demais barras, com exceção da barra 10, que ainda apresenta violação na magnitude da tensão, como mostra a tabela 6.16.

Tabela 6.16: Resultado após regra R2 - redução de carga (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
9	1,037	0,00242	-13,53	-	-
10	1,034	0,00400	-15,03	-	-
11	1,050	0,00000	-13,56	6,64	1,1137
12	1,039	0,00251	-14,23	-	-
13	1,038	0,00000	-14,23	13,05	0,4249
14	1,027	0,00372	-15,06	-	-
15	1,023	0,00411	-15,17	-	-
16	1,030	0,00369	-14,82	-	-
17	1,028	0,00430	-15,16	-	-
18	1,016	0,00106	-15,68	-	-
19	1,014	0,00233	-15,83	-	-
20	1,018	0,00107	-15,83	-	-
21	1,023	0,00495	-16,50	-	-
22	1,016	0,00492	-16,49	-	-
23	1,016	0,00217	-15,95	-	-

Como mencionado anteriormente, após a aplicação da regra R2 ainda há violação das magnitudes das tensões nas barras 9, 10 e 12, e da geração de potência reativa. Observando o sistema teste IEEE-30 barras, evidência que estas três barras são terminais de transformadores, e portanto, a regra R6 torna-se ideal para corrigir estas violações. A tabela 6.17 apresenta o estado de rede para estas três barras, após este controle.

Tabela 6.17: Resultados após R6 - redução de carga (IEEE-30 barras)

Bus	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVAr)	$\alpha_{Q_G}$ (MVAr)
9	1,014	0,00242	-13,79	-	-
10	1,009	0,00400	-15,33	-	-
12	1,020	0,00251	-14,64	-	-

E finalmente, a regra R3 é aplicada para corrigir a geração de potência reativa nas barra 2 ( $Q_{G_2} = 48,37$  MVA ,  $\alpha_{Q_{G_2}} = 3,7561$  MVA and  $V_2 = 1,044$  pu).

A tabela 6.18 apresenta o estado final de rede, para a redução de carga em 10%, após as ações de controles, permitindo que todas as violações fossem eliminadas.

Tabela 6.18: Estado de rede - final (redução de carga - IEEE-30 barras)

Bus	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVar)	$\alpha_{Q_G}$ (MVar)
1	1,060	0,00000	0,00	-19,09	1,2276
2	1,044	0,00000	-5,26	48,37	1,6210
3	1,024	0,00186	-7,60	-	-
4	1,016	0,00201	-9,17	-	-
5	1,010	0,00000	-13,96	35,04	2,5249
6	1,013	0,00150	-10,83	-	-
7	1,004	0,00154	-12,64	-	-
8	1,010	0,00000	-11,52	29,77	3,5123
9	1,014	0,00242	-13,79	-	-
10	1,009	0,00400	-15,33	-	-
11	1,050	0,00000	-13,79	6,64	1,1137
12	1,020	0,00251	-14,64	-	-
13	1,038	0,00000	-14,64	13,21	0,4249
14	1,006	0,00372	-15,50	-	-
15	1,002	0,00411	-15,58	-	-
16	1,009	0,00369	-15,20	-	-
17	1,004	0,00430	-15,49	-	-
18	0,993	0,00106	-16,17	-	-
19	0,991	0,00233	-16,33	-	-
20	0,995	0,00107	-16,13	-	-
21	0,998	0,00495	-15,76	-	-
22	0,998	0,00492	-15,75	-	-
23	0,993	0,00217	-15,95	-	-
24	1,013	0,00584	-15,73	-	-
25	1,013	0,00533	-15,40	-	-
26	0,997	0,00668	-15,78	-	-
27	1,021	0,00434	-14,93	-	-
28	1,009	0,00169	-11,40	-	-
29	1,003	0,00590	-16,04	-	-
30	0,993	0,00679	-16,84	-	-

### 6.1.3 Sistema Real

Para este sistema estão disponíveis os seguintes controles: geradores síncronos nas barras 212, 213, 214, 215 e 216; tap de transformadores entre os ramos 3-2 , 199-75, 201-117, 116-117, 208-127 e 209-127, e banco de capacitores nas barras 60, 143, 185 e 204.

Na tabela 6.19 são apresentados os limites operacionais das magnitudes das tensões e das potências reativas nas barras de geração para o sistema real de 216 barras.

Tabela 6.19: Limites Operacionais - Rede Real

Bus	V (pu)			$Q_G$ (MVA)	
	Limite inferior	Tensão nominal	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
212	0,973	1,003	1,033	-4,00	4,00
213	0,974	1,004	1,034	-10,00	10,00
214	0,972	1,021	1,052	0,00	40,00
215	0,997	1,028	1,059	-2,00	30,00
216	0,995	1,026	1,057	-6,00	106,00

Para as barras de adotou-se  $0,97 < V_c < 1,03$  pu.

A tabela 6.20 apresenta o estado da rede e a geração de potência reativa para o caso base, ou seja, sem atuação de qualquer tipo de controle, considerando a rede em um ponto de operação com 30% de sobrecarga. Esta rede não apresenta nenhum tipo de violação se considerarmos os dados fornecidos pelo banco de dados, sendo necessário criar uma situação de violação para verificar o desempenho do método. Para pontos operações com sobrecarga menor a 30% ocorre somente violações das magnitudes das tensões para as barras de cargas.

A partir dos valores mostrados na tabela 6.20, verifica-se que há violação nos valores (limite inferior) das potências reativas em 3 das barras de geração (212, 215, 216). Verifica-se, ainda, que um considerado número de barras de carga (barras destacadas em negrito) há violação do limite superior da magnitude da tensão.



Tabela 6.20: Estado da rede real - caso base

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)	Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,009	0,00000	0,00	189,92	13,2944	55	<b>0,976</b>	<b>0,00616</b>	<b>-3,42</b>	-	-
2	<b>0,954</b>	<b>0,00564</b>	<b>-5,59</b>	-	-	56	0,982	0,00624	-3,00	-	-
3	<b>0,966</b>	<b>0,00547</b>	<b>-5,30</b>	-	-	57	0,981	0,00622	-3,07	-	-
4	0,989	0,00316	-1,80	-	-	58	<b>0,971</b>	<b>0,00647</b>	<b>-3,75</b>	-	-
5	0,990	0,00312	-1,75	-	-	59	0,981	0,00632	-3,08	-	-
6	1,000	0,00241	-0,86	-	-	60	0,982	0,00624	-3,00	-	-
7	0,990	0,00316	-1,77	-	-	61	0,979	0,00637	-3,21	-	-
8	0,990	0,00316	-1,77	-	-	62	0,981	0,00622	-3,07	-	-
9	1,000	0,00245	-0,87	-	-	63	0,977	0,00642	-3,36	-	-
10	0,987	0,00380	-2,06	-	-	64	0,977	0,00642	-3,36	-	-
11	0,987	0,00375	-2,01	-	-	65	0,980	0,00620	-3,14	-	-
12	0,998	0,00308	-1,10	-	-	66	0,981	0,00744	-3,20	-	-
13	0,985	0,00419	-2,20	-	-	67	<b>0,969</b>	<b>0,00850</b>	<b>-4,02</b>	-	-
14	0,986	0,00415	-2,16	-	-	68	<b>0,969</b>	<b>0,00847</b>	<b>-3,99</b>	-	-
15	0,996	0,00357	-1,28	-	-	69	<b>0,961</b>	<b>0,00915</b>	<b>-4,40</b>	-	-
16	0,985	0,00644	-2,41	-	-	70	<b>0,965</b>	<b>0,00885</b>	<b>-4,28</b>	-	-
17	0,984	0,00617	-2,52	-	-	71	<b>0,973</b>	<b>0,00606</b>	<b>-3,59</b>	-	-
18	0,985	0,00643	-2,41	-	-	72	<b>0,970</b>	<b>0,00631</b>	<b>-3,81</b>	-	-
19	0,985	0,00648	-2,42	-	-	73	<b>0,975</b>	<b>0,00611</b>	<b>-3,46</b>	-	-
20	0,984	0,00622	-2,52	-	-	74	<b>0,971</b>	<b>0,00646</b>	<b>-3,75</b>	-	-
21	0,985	0,00648	-2,42	-	-	75	<b>0,937</b>	<b>0,01348</b>	<b>-5,41</b>	-	-
22	0,983	0,00637	-2,59	-	-	76	<b>0,911</b>	<b>0,01445</b>	<b>-6,45</b>	-	-
23	0,983	0,00665	-2,40	-	-	77	<b>0,911</b>	<b>0,01445</b>	<b>-6,45</b>	-	-
24	0,984	0,00636	-2,58	-	-	78	<b>0,918</b>	<b>0,01392</b>	<b>-5,83</b>	-	-
25	0,983	0,00664	-2,40	-	-	79	<b>0,918</b>	<b>0,01392</b>	<b>-5,83</b>	-	-
26	0,984	0,00631	-2,54	-	-	80	<b>0,940</b>	<b>0,01215</b>	<b>-5,63</b>	-	-
27	0,984	0,00655	-2,42	-	-	81	0,986	0,00666	-2,54	-	-
28	1,000	0,00069	-0,67	-	-	82	0,986	0,00666	-2,53	-	-
29	1,004	0,00044	-0,53	-	-	83	0,985	0,00671	-2,56	-	-
30	1,004	0,00042	-0,50	-	-	84	0,981	0,00692	-2,90	-	-
31	1,003	0,00051	-0,48	-	-	85	0,983	0,00674	-3,09	-	-
32	0,992	0,00403	-1,88	-	-	86	0,979	0,00705	-3,39	-	-
33	0,993	0,00391	-1,73	-	-	87	0,980	0,00693	-3,28	-	-
34	0,992	0,00403	-1,88	-	-	88	0,987	0,00641	-2,67	-	-
35	0,991	0,00436	-2,04	-	-	89	0,977	0,00698	-3,27	-	-
36	0,992	0,00423	-1,88	-	-	90	0,985	0,00662	-2,69	-	-
37	0,991	0,00436	-2,04	-	-	91	0,981	0,00692	-2,90	-	-
38	0,971	0,00605	-3,71	-	-	92	0,983	0,00653	-3,04	-	-
39	0,970	0,00618	-3,88	-	-	93	0,980	0,00698	-3,32	-	-
40	0,972	0,00604	-3,71	-	-	94	0,983	0,00672	-3,07	-	-
41	0,970	0,00613	-3,79	-	-	95	0,987	0,00641	-2,67	-	-
42	0,972	0,00603	-3,69	-	-	96	0,984	0,00668	-3,03	-	-
43	0,970	0,00634	-3,84	-	-	97	0,987	0,00641	-2,67	-	-
44	0,980	0,00634	-3,20	-	-	98	0,988	0,00646	-2,65	-	-
45	0,998	0,00619	-3,32	-	-	99	0,987	0,00652	-2,72	-	-
46	0,972	0,00629	-3,53	-	-	100	0,988	0,00645	-2,61	-	-
47	0,980	0,00634	-3,20	-	-	101	0,988	0,00647	-2,51	-	-
48	0,981	0,00624	-3,08	-	-	102	0,990	0,00638	-2,44	-	-
49	0,976	0,00631	-3,49	-	-	103	0,989	0,00644	-2,48	-	-
50	0,977	0,00619	-3,32	-	-	104	0,985	0,00672	-2,52	-	-
51	0,973	0,00630	-3,67	-	-	105	0,986	0,00671	-2,53	-	-
52	0,972	0,00609	-3,73	-	-	106	0,986	0,00671	-2,53	-	-
53	0,974	0,00592	-3,55	-	-	107	0,986	0,00665	-2,48	-	-
54	0,974	0,00630	-3,61	-	-	108	0,987	0,00666	-2,47	-	-

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
109	0,988	0,00652	-2,26	-	-
110	0,988	0,00658	-2,40	-	-
111	0,983	0,00644	-3,00	-	-
112	0,983	0,00643	-3,00	-	-
113	0,982	0,00647	-3,02	-	-
114	0,983	0,00653	-3,04	-	-
115	0,980	0,00661	-3,08	-	-
116	<b>0,952</b>	<b>0,01115</b>	<b>-5,48</b>	-	-
117	<b>0,941</b>	<b>0,01101</b>	<b>-5,48</b>	-	-
118	<b>0,950</b>	<b>0,01130</b>	<b>-5,51</b>	-	-
119	<b>0,969</b>	<b>0,00871</b>	<b>-4,16</b>	-	-
120	<b>0,969</b>	<b>0,00864</b>	<b>-4,07</b>	-	-
121	<b>0,969</b>	<b>0,00872</b>	<b>-4,00</b>	-	-
122	<b>0,969</b>	<b>0,00862</b>	<b>-4,08</b>	-	-
123	<b>0,969</b>	<b>0,00869</b>	<b>-4,05</b>	-	-
124	<b>0,966</b>	<b>0,00875</b>	<b>-4,18</b>	-	-
125	<b>0,968</b>	<b>0,00834</b>	<b>-4,23</b>	-	-
126	<b>0,944</b>	<b>0,01194</b>	<b>-5,43</b>	-	-
127	<b>0,931</b>	<b>0,00868</b>	<b>-6,77</b>	-	-
128	<b>0,934</b>	<b>0,00937</b>	<b>-6,80</b>	-	-
129	<b>0,941</b>	<b>0,00886</b>	<b>-6,73</b>	-	-
130	<b>0,862</b>	<b>0,01895</b>	<b>-8,92</b>	-	-
131	<b>0,882</b>	<b>0,01708</b>	<b>-8,02</b>	-	-
132	<b>0,912</b>	<b>0,01268</b>	<b>-7,76</b>	-	-
133	<b>0,904</b>	<b>0,01505</b>	<b>-7,11</b>	-	-
134	<b>0,934</b>	<b>0,00823</b>	<b>-7,20</b>	-	-
135	<b>0,923</b>	<b>0,00929</b>	<b>-8,22</b>	-	-
136	0,985	0,00662	-2,70	-	-
137	0,983	0,00655	-2,95	-	-
138	0,979	0,00678	-3,11	-	-
139	0,928	0,01341	-5,31	-	-
140	<b>0,928</b>	<b>0,01341</b>	<b>-5,31</b>	-	-
141	<b>0,911</b>	<b>0,01445</b>	<b>-6,44</b>	-	-
142	<b>0,970</b>	<b>0,00619</b>	<b>-3,89</b>	-	-
143	0,987	0,00641	-2,77	-	-
144	<b>0,975</b>	<b>0,00610</b>	<b>-3,48</b>	-	-
145	<b>0,975</b>	<b>0,00613</b>	<b>-3,52</b>	-	-
146	<b>0,970</b>	<b>0,00652</b>	<b>-3,81</b>	-	-
147	<b>0,975</b>	<b>0,00610</b>	<b>-3,48</b>	-	-
148	<b>0,970</b>	<b>0,00645</b>	<b>-3,76</b>	-	-
149	<b>0,966</b>	<b>0,00887</b>	<b>-4,25</b>	-	-
150	<b>0,966</b>	<b>0,00887</b>	<b>-4,25</b>	-	-
151	<b>0,973</b>	<b>0,00823</b>	<b>-3,75</b>	-	-
152	<b>0,975</b>	<b>0,00802</b>	<b>-3,59</b>	-	-
153	<b>0,965</b>	<b>0,00892</b>	<b>-4,27</b>	-	-
154	<b>0,976</b>	<b>0,00795</b>	<b>-3,54</b>	-	-
155	0,987	0,00675	-2,53	-	-
156	0,988	0,00671	-2,48	-	-
157	0,990	0,00653	-2,33	-	-
158	<b>0,963</b>	<b>0,00890</b>	<b>-4,13</b>	-	-
159	<b>0,965</b>	<b>0,00895</b>	<b>-4,29</b>	-	-
160	<b>0,963</b>	<b>0,00886</b>	<b>-4,11</b>	-	-
161	<b>0,959</b>	<b>0,00922</b>	<b>-4,41</b>	-	-
162	<b>0,963</b>	<b>0,00901</b>	<b>-4,31</b>	-	-

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
<b>163</b>	<b>0,960</b>	<b>0,00914</b>	<b>-4,35</b>	-	-
<b>164</b>	<b>0,960</b>	<b>0,00914</b>	<b>-4,34</b>	-	-
<b>165</b>	<b>0,964</b>	<b>0,00898</b>	<b>-4,30</b>	-	-
<b>166</b>	<b>0,961</b>	<b>0,00904</b>	<b>-4,27</b>	-	-
<b>167</b>	<b>0,973</b>	<b>0,00632</b>	<b>-3,69</b>	-	-
<b>168</b>	<b>0,973</b>	<b>0,00632</b>	<b>-3,69</b>	-	-
169	1,003	0,00236	-2,41	-	-
<b>170</b>	<b>0,940</b>	<b>0,00880</b>	<b>-6,70</b>	-	-
<b>171</b>	<b>0,979</b>	<b>0,00437</b>	<b>-2,87</b>	-	-
172	0,978	0,00437	-2,87	-	-
<b>173</b>	<b>0,940</b>	<b>0,00880</b>	<b>-6,70</b>	-	-
<b>174</b>	<b>0,971</b>	<b>0,00559</b>	<b>-3,56</b>	-	-
<b>175</b>	<b>0,970</b>	<b>0,00589</b>	<b>-3,81</b>	-	-
<b>176</b>	<b>0,971</b>	<b>0,00564</b>	<b>-3,61</b>	-	-
<b>177</b>	<b>0,969</b>	<b>0,00596</b>	<b>-3,87</b>	-	-
<b>178</b>	<b>0,971</b>	<b>0,00564</b>	<b>-3,61</b>	-	-
<b>179</b>	<b>0,969</b>	<b>0,00596</b>	<b>-3,88</b>	-	-
180	0,975	0,00449	-3,27	-	-
181	0,979	0,00389	-2,87	-	-
182	0,976	0,00433	-2,80	-	-
183	0,976	0,00435	-2,82	-	-
184	0,990	0,00252	-1,64	-	-
185	0,997	0,00168	-1,16	-	-
186	0,990	0,00253	-1,66	-	-
187	0,980	0,00667	-3,14	-	-
188	0,983	0,00653	-3,02	-	-
189	0,980	0,00664	-3,10	-	-
<b>190</b>	<b>0,915</b>	<b>0,01474</b>	<b>-5,33</b>	-	-
<b>191</b>	<b>0,909</b>	<b>0,01523</b>	<b>-5,30</b>	-	-
<b>192</b>	<b>0,906</b>	<b>0,01552</b>	<b>-5,23</b>	-	-
193	1,005	0,00038	-0,43	-	-
194	1,004	0,00041	-0,39	-	-
195	1,005	0,00038	-0,43	-	-
<b>196</b>	<b>0,972</b>	<b>0,00609</b>	<b>-3,73</b>	-	-
197	0,981	0,00359	-2,57	-	-
198	0,986	0,00666	-2,48	-	-
<b>199</b>	<b>0,924</b>	<b>0,01332</b>	<b>-5,41</b>	-	-
200	0,994	0,00620	-2,06	-	-
201	0,992	0,00640	-2,39	-	-
202	0,984	0,00625	-2,89	-	-
203	0,984	0,00339	-2,32	-	-
<b>204</b>	<b>0,969</b>	<b>0,00864</b>	<b>-4,06</b>	-	-
<b>205</b>	<b>0,961</b>	<b>0,00912</b>	<b>-4,38</b>	-	-
206	1,008	0,00008	-0,06	-	-
<b>207</b>	<b>0,912</b>	<b>0,01268</b>	<b>-7,76</b>	-	-
<b>208</b>	<b>0,972</b>	<b>0,00574</b>	<b>-3,64</b>	-	-
<b>209</b>	<b>0,944</b>	<b>0,00869</b>	<b>-6,65</b>	-	-
<b>210</b>	<b>0,904</b>	<b>0,01504</b>	<b>-7,10</b>	-	-
<b>211</b>	<b>0,971</b>	<b>0,00600</b>	<b>-3,73</b>	-	-
<b>212</b>	<b>1,003</b>	<b>0,00000</b>	<b>-4,18</b>	<b>7,36</b>	<b>0,9972</b>
213	1,004	0,00000	-2,41	1,50	1,8952
214	1,021	0,00000	0,00	33,48	0,0000
<b>215</b>	<b>1,028</b>	<b>0,00000</b>	<b>-2,39</b>	<b>38,92</b>	<b>4,0133</b>
<b>216</b>	<b>1,026</b>	<b>0,00000</b>	<b>-2,06</b>	<b>159,16</b>	<b>17,4377</b>

Tendo como objetivo atender as restrições dos limites operacionais das magnitudes da tensões e das potências reativas, foram aplicadas as seguintes regras: R1, R2, R3, R4, R6.

Tabela 6.21: Regras Utilizadas

Regras	Descrição	Ação de controle
	Se	Então
R1	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ e $Q_k - \alpha_{Q_k} > Qmin_k$ ou $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e $Q_k + \alpha_{Q_k} < Qmax_k$ ou $V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ e $TAP_k - \alpha_{TAP_k} > TAPmin_k$ ou $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e $TAP_k + \alpha_{TAP_k} < TAPmax_k$	realizar o controle da tensão através da injeção de potência reativa na barra
R2	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ e $Q_k = Qmin_k$ $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e $Q_k = Qmax_k$ e há na vizinhança um condensador síncrono que pode eliminar a violação através da injeção de reativos	realizar o controle
R3	$Q_k - \alpha_{Q_k} < Qmin_k$ e $V_k + \alpha_{V_k} < Vmax_k$ ou $Q_k + \alpha_{Q_k} > Qmax_k$ e $V_k - \alpha_{V_k} > Vmin_k$	controlar o suporte de potência reativa na barra $k$
R4	$V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$	realizar controle da tensão através de bancos de capacitores ou desligar banco de indutores quando existir na própria barra ou vizinhança
R6	$V_k + \alpha_{V_k} > Vmax_k$ ou $V_k - \alpha_{V_k} < Vmin_k$ e havendo tap disponível que viabilize o controle	realizar o controle independentemente da existência ou não de controles disponíveis

Através da R1 é possível corrigir algumas barras de carga (58, 71, 73, 144, 145, 171, 208) e melhorar as magnitudes das tensões das demais, deste modo pode-se dizer que o controle não seja suficiente para corrigir as magnitudes das tensões, pois para o pior caso  $V \pm \alpha_V$ , estas tensões continuam violando o limite inferior das magnitudes das tensões, como mostra a tabela 6.22.

Tabela 6.22: Resultados após o controle - regra R1 (Sistema Real)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
2	0,970	0,00465	-5,28	-	-
3	0,970	0,00547	-5,02	-	-
67	0,970	0,00761	-4,04	-	-
68	0,970	0,00687	-4,01	-	-
69	0,970	0,00879	-4,55	-	-
70	0,970	0,00765	-4,37	-	-
75	0,970	0,00948	-5,73	-	-
76	0,970	0,00945	-7,01	-	-
77	0,970	0,00945	-7,01	-	-
78	0,970	0,00992	-6,48	-	-
79	0,970	0,01092	-6,48	-	-
80	0,970	0,01115	-5,63	-	-
116	0,970	0,00915	-5,15	-	-
117	0,970	0,01001	-5,15	-	-
118	0,970	0,01030	-5,22	-	-
119	0,970	0,00871	-4,15	-	-
120	0,970	0,00864	-4,04	-	-
121	0,970	0,00872	-3,99	-	-
122	0,970	0,00862	-4,06	-	-
123	0,970	0,00869	-4,04	-	-
124	0,970	0,00875	-4,23	-	-
125	0,970	0,00834	-4,23	-	-
126	0,970	0,00994	-5,42	-	-
127	0,970	0,00868	-6,63	-	-
128	0,970	0,00937	-7,01	-	-
129	0,970	0,00886	-6,67	-	-
130	0,970	0,01595	-10,81	-	-
131	0,970	0,01208	-9,38	-	-
132	0,970	0,01168	-8,35	-	-
133	0,970	0,01305	-7,82	-	-
134	0,970	0,00823	-7,64	-	-
135	0,970	0,00929	-9,07	-	-
140	0,970	0,01141	-5,92	-	-
141	0,970	0,01245	-7,01	-	-
142	0,970	0,00619	-3,88	-	-
146	0,970	0,00652	-3,81	-	-
149	0,970	0,00887	-4,30	-	-
150	0,970	0,00887	-4,30	-	-
153	0,970	0,00892	-4,34	-	-
158	0,970	0,00890	-4,23	-	-

continuação, página seguinte...

Continuação - Resultados após o controle - regra R1 (Sistema Real)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
159	0,970	0,00895	-4,37	-	-
160	0,970	0,00886	-4,20	-	-
161	0,970	0,00922	-4,60	-	-
162	0,970	0,00901	-4,43	-	-
163	0,970	0,00914	-4,52	-	-
164	0,970	0,00914	-4,51	-	-
165	0,970	0,00898	-4,40	-	-
166	0,970	0,00904	-4,41	-	-
170	0,970	0,00880	-6,67	-	-
173	0,970	0,00880	-6,67	-	-
175	0,970	0,00589	-3,80	-	-
177	0,970	0,00596	-3,89	-	-
179	0,970	0,00596	-3,89	-	-
190	0,970	0,01174	-6,39	-	-
191	0,970	0,01223	-6,58	-	-
192	0,970	0,01352	-6,72	-	-
199	0,970	0,01032	-5,74	-	-
204	0,970	0,00864	-4,04	-	-
205	0,970	0,00912	-4,52	-	-
207	0,970	0,01068	-8,35	-	-
209	0,970	0,00869	-6,52	-	-
210	0,970	0,01204	-7,82	-	-

Fez-se uso da R6 para corrigir as magnitudes das tensões nas barras terminais dos transformadores (119-75, 204-117, 208-127, 209-127), o que permitiu corrigir as tensões nas barras 117, 127, 199 e 209. Na barra 204 existe um banco de capacitores, sendo possível realizar a correção da magnitude da tensão nesta barra através da R4, estas correções são mostradas na tabela 6.23.

Tabela 6.23: Resultados após o controle - regra R6 e R4 (Sistema Real)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
117	0,987	0,00931	-5,02	-	-
127	0,985	0,00629	-5,83	-	-
199	0,991	0,00923	-4,27	-	-
204	0,997	0,00583	-4,14	-	-
209	0,983	0,00721	-5,25	-	-
210	0,997	0,01104	-6,92	-	-

Para as violações dos limites de geração de potência reativa fez-se uso da R3  $Q_{G_{212}} = 3,33$  MVA e  $\alpha_{Q_{212}} = 0,7321$  MVA;  $Q_{G_{215}} = 28,56$  MVA e  $\alpha_{Q_{215}} = 1,7836$  MVA; e  $Q_{G_{216}} = 97,87$  MVA e  $\alpha_{Q_{216}} = 5,3963$  MVA;

Mesmo após aplicação dessas regras ainda é possível observar que existe algumas violações de magnitude da tensão, e fazendo uma análise da rede, aplica-se a R2 para corrigir tensões que estão na segunda vizinha dos condensadores síncronos existentes na rede. Assim, foi possível atender as condições de operação, e o estado final da rede se encontra na tabela 6.24

Tabela 6.24: Estado da rede real - final

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)	Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,0090	0,00000	0,0000	-	-	37	1,0037	0,00288	-0,5848	-	-
2	0,9758	0,00309	-3,2382	-	-	38	0,9917	0,00396	-1,5791	-	-
3	0,9871	0,00299	-3,0765	-	-	39	0,9905	0,00405	-1,6911	-	-
4	0,9996	0,00201	-0,6878	-	-	40	0,9917	0,00396	-1,5749	-	-
5	1,0000	0,00199	-0,6563	-	-	41	0,9910	0,00401	-1,6306	-	-
6	1,0074	0,00153	-0,0519	-	-	42	0,9918	0,00395	-1,5645	-	-
7	0,9999	0,00202	-0,6594	-	-	43	0,9908	0,00417	-1,6228	-	-
8	0,9999	0,00202	-0,6591	-	-	44	0,9994	0,00427	-0,9881	-	-
9	1,0074	0,00156	-0,0523	-	-	45	0,9968	0,00412	-1,1573	-	-
10	0,9989	0,00244	-0,7029	-	-	46	0,9944	0,00417	-1,3274	-	-
11	0,9994	0,00241	-0,6711	-	-	47	0,9994	0,00427	-0,9867	-	-
12	1,0070	0,00198	-0,0590	-	-	48	1,0003	0,00420	-0,9097	-	-
13	0,9990	0,00271	-0,6821	-	-	49	0,9958	0,00420	-1,2648	-	-
14	0,9994	0,00268	-0,6513	-	-	50	0,9968	0,00412	-1,1569	-	-
15	1,0066	0,00231	-0,0643	-	-	51	0,9935	0,00416	-1,4392	-	-
16	1,0042	0,00436	-0,0974	-	-	52	0,9918	0,00399	-1,5534	-	-
17	1,0032	0,00415	-0,1551	-	-	53	0,9933	0,00388	-1,4338	-	-
18	1,0042	0,00435	-0,0946	-	-	54	0,9943	0,00418	-1,3739	-	-
19	1,0040	0,00439	-0,0852	-	-	55	0,9956	0,00408	-1,2518	-	-
20	1,0032	0,00418	-0,1441	-	-	56	1,0010	0,00421	-0,8322	-	-
21	1,0040	0,00439	-0,0835	-	-	57	1,0001	0,00419	-0,9017	-	-
22	1,0028	0,00429	-0,1572	-	-	58	0,9919	0,00428	-1,5060	-	-
23	1,0031	0,00450	-0,0379	-	-	59	1,0003	0,00426	-0,8827	-	-
24	1,0030	0,00428	-0,1488	-	-	60	1,0010	0,00421	-0,8309	-	-
25	1,0031	0,00450	-0,0383	-	-	61	0,9989	0,00428	-0,9926	-	-
26	1,0034	0,00425	-0,1211	-	-	62	1,0001	0,00419	-0,9016	-	-
27	1,0039	0,00444	-0,0489	-	-	63	0,9972	0,00431	-1,1194	-	-
28	1,0030	0,00046	-0,4439	-	-	64	0,9973	0,00430	-1,1176	-	-
29	1,0056	0,00029	-0,3516	-	-	65	0,9992	0,00416	-0,9801	-	-
30	1,0058	0,00028	-0,3258	-	-	66	1,0032	0,00511	-0,5569	-	-
31	1,0048	0,00034	-0,3176	-	-	67	0,9960	0,00576	-0,9787	-	-
32	1,0041	0,00265	-0,5412	-	-	68	0,9961	0,00575	-0,9602	-	-
33	1,0051	0,00257	-0,4424	-	-	69	0,9912	0,00616	-1,0337	-	-
34	1,0041	0,00265	-0,5407	-	-	70	0,9933	0,00598	-1,0946	-	-
35	1,0037	0,00288	-0,5849	-	-	71	0,9932	0,00399	-1,4572	-	-
36	1,0047	0,00279	-0,4789	-	-	72	0,9911	0,00415	-1,5991	-	-

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)	Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
73	0,9951	0,00404	-1,3124	-	-	127	0,9927	0,00512	-3,4520	-	-
74	0,9920	0,00427	-1,5008	-	-	128	0,9989	0,00556	-3,5413	-	-
75	0,9810	0,00861	-1,1745	-	-	129	0,9831	0,00523	-3,5007	-	-
76	0,9897	0,00914	-1,9352	-	-	130	0,9885	0,00963	-3,5939	-	-
77	0,9897	0,00914	-1,9353	-	-	131	0,9813	0,00857	-3,0571	-	-
78	0,9951	0,00890	-1,5046	-	-	132	0,9869	0,00769	-3,5125	-	-
79	0,9951	0,00890	-1,5045	-	-	133	0,9852	0,00942	-2,5054	-	-
80	0,9808	0,00787	-1,5190	-	-	134	0,9865	0,00472	-4,3192	-	-
81	1,0057	0,00455	0,0532	-	-	135	0,9896	0,00540	-4,9916	-	-
82	1,0057	0,00455	0,0548	-	-	136	1,0046	0,00450	-0,1833	-	-
83	1,0053	0,00457	0,0364	-	-	137	1,0029	0,00445	-0,5500	-	-
84	1,0018	0,00470	-0,3094	-	-	138	1,0002	0,00458	-0,6517	-	-
85	1,0033	0,00459	-0,3671	-	-	139	0,9846	0,00864	-1,4151	-	-
86	1,0007	0,00479	-0,5656	-	-	140	0,9846	0,00864	-1,4151	-	-
87	1,0016	0,00471	-0,4931	-	-	141	0,9897	0,00914	-1,9350	-	-
88	1,0062	0,00438	-0,0948	-	-	142	0,9904	0,00405	-1,6948	-	-
89	0,9984	0,00471	-0,7523	-	-	143	1,0055	0,00441	-0,4909	-	-
90	1,0047	0,00451	-0,1680	-	-	144	0,9948	0,00404	-1,3363	-	-
91	1,0018	0,00470	-0,3077	-	-	145	0,9947	0,00405	-1,3589	-	-
92	1,0023	0,00443	-0,6743	-	-	146	0,9911	0,00431	-1,5496	-	-
93	1,0012	0,00474	-0,5217	-	-	147	0,9948	0,00404	-1,3339	-	-
94	1,0034	0,00458	-0,3588	-	-	148	0,9918	0,00426	-1,5197	-	-
95	1,0062	0,00438	-0,0938	-	-	149	0,9948	0,00597	-0,7852	-	-
96	1,0038	0,00455	-0,3318	-	-	150	0,9948	0,00597	-0,7843	-	-
97	1,0061	0,00438	-0,0935	-	-	151	0,9994	0,00557	-0,4367	-	-
98	1,0068	0,00443	0,0366	-	-	152	1,0004	0,00543	-0,3285	-	-
99	1,0062	0,00446	-0,0119	-	-	153	0,9941	0,00600	-0,8156	-	-
100	1,0069	0,00441	0,0607	-	-	154	1,0010	0,00539	-0,2965	-	-
101	1,0077	0,00445	0,2390	-	-	155	1,0074	0,00464	0,3593	-	-
102	1,0084	0,00439	0,2827	-	-	156	1,0078	0,00461	0,3926	-	-
103	1,0079	0,00443	0,2536	-	-	157	1,0095	0,00450	0,5018	-	-
104	1,0055	0,00459	0,0928	-	-	158	0,9920	0,00600	-0,7427	-	-
105	1,0056	0,00458	0,0879	-	-	159	0,9936	0,00602	-0,8369	-	-
106	1,0056	0,00458	0,0895	-	-	160	0,9923	0,00597	-0,7307	-	-
107	1,0061	0,00454	0,1245	-	-	161	0,9897	0,00620	-0,9461	-	-
108	1,0064	0,00456	0,2053	-	-	162	0,9927	0,00606	-0,8749	-	-
109	1,0076	0,00447	0,2787	-	-	163	0,9904	0,00615	-0,9055	-	-
110	1,0071	0,00451	0,2512	-	-	164	0,9902	0,00614	-0,8911	-	-
111	1,0026	0,00437	-0,6939	-	-	165	0,9932	0,00604	-0,8567	-	-
112	1,0026	0,00437	-0,6936	-	-	166	0,9910	0,00609	-0,8419	-	-
113	1,0013	0,00437	-0,7082	-	-	167	0,9933	0,00418	-1,4514	-	-
114	1,0023	0,00443	-0,6732	-	-	168	0,9933	0,00418	-1,4526	-	-
115	1,0007	0,00447	-0,7001	-	-	169	1,0094	0,00161	0,2949	-	-
116	0,9891	0,00728	-1,4918	-	-	170	0,9828	0,00519	-3,5431	-	-
117	0,9774	0,00719	-1,4891	-	-	171	0,9934	0,00279	-1,3771	-	-
118	0,9879	0,00736	-1,4988	-	-	172	0,9934	0,00279	-1,3779	-	-
119	0,9965	0,00587	-0,7069	-	-	173	0,9827	0,00519	-3,5447	-	-
120	0,9970	0,00583	-0,6433	-	-	174	0,9905	0,00362	-1,6327	-	-
121	0,9968	0,00589	-0,5734	-	-	175	0,9898	0,00383	-1,7457	-	-
122	0,9969	0,00581	-0,6553	-	-	176	0,9900	0,00366	-1,6712	-	-
123	0,9966	0,00586	-0,6191	-	-	177	0,9892	0,00387	-1,7880	-	-
124	0,9943	0,00589	-0,6919	-	-	178	0,9900	0,00366	-1,6720	-	-
125	0,9954	0,00561	-0,7853	-	-	179	0,9891	0,00388	-1,7921	-	-
126	0,9842	0,00775	-1,4682	-	-	180	0,9908	0,00288	-1,7521	-	-

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)	Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
181	0,9931	0,00248	-1,5683	-	-	199	0,9982	0,00851	-1,1783	-	-
182	0,9916	0,00277	-1,4213	-	-	200	1,0114	0,00429	0,6805	-	-
183	0,9915	0,00278	-1,4339	-	-	201	1,0105	0,00447	-0,0826	-	-
184	0,9990	0,00159	-0,8588	-	-	202	1,0025	0,00423	-0,7194	-	-
185	1,0026	0,00105	-0,6375	-	-	203	0,9954	0,00215	-1,1957	-	-
186	0,9989	0,00160	-0,8698	-	-	204	0,9971	0,00583	-0,6427	-	-
187	1,0004	0,00451	-0,7267	-	-	205	0,9913	0,00613	-0,9475	-	-
188	1,0024	0,00443	-0,6526	-	-	206	1,0087	0,00005	-0,0281	-	-
189	1,0006	0,00449	-0,6982	-	-	207	0,9869	0,00769	-3,5126	-	-
190	0,9867	0,00944	-1,4566	-	-	208	0,9916	0,00372	-1,5677	-	-
191	0,9833	0,00973	-1,4388	-	-	209	0,9853	0,00513	-3,3793	-	-
192	0,9912	0,00990	-1,3940	-	-	210	0,9849	0,00942	-2,4947	-	-
193	1,0061	0,00025	-0,2794	-	-	211	0,9912	0,00392	-1,6155	-	-
194	1,0057	0,00027	-0,2510	-	-	212	1,0030	0,00000	-0,6919	3,33	0,7321
195	1,0061	0,00025	-0,2784	-	-	213	1,0040	0,00000	0,2949	-7,6261	1,2956
196	0,9917	0,00399	-1,5561	-	-	214	1,0210	0,00000	0,0000	33,4754	0,0000
197	0,9936	0,00228	-1,3644	-	-	215	1,0280	0,00000	-0,0826	28,56	1,7836
198	1,0061	0,00455	0,1178	-	-	216	1,0260	0,00000	0,6805	97,87	5,3963

Nas figuras 6.1 e 6.2 são apresentados os gráficos com os estados da rede real para o caso base e após a aplicação do algoritmo de controle, sendo possível observar o comportamento das magnitudes das tensões.

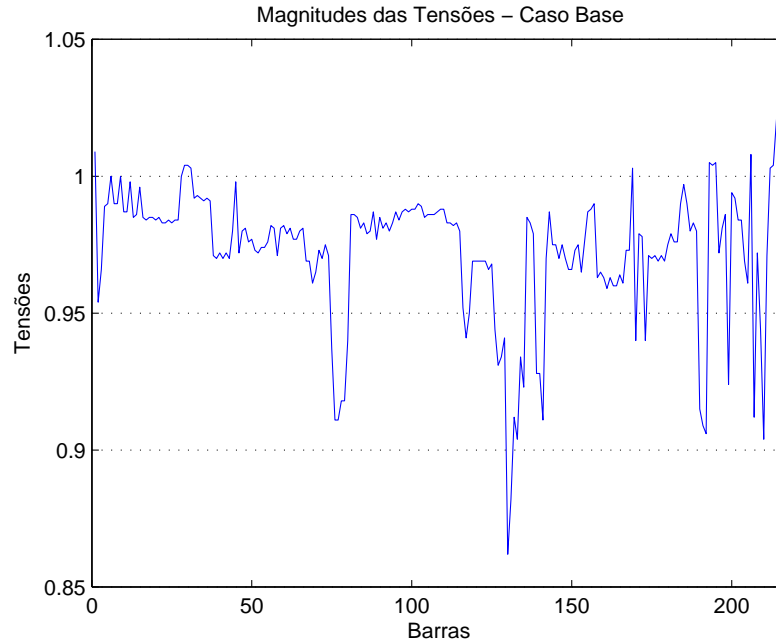


Figura 6.1: Magnitudes das Tensões - Caso Base



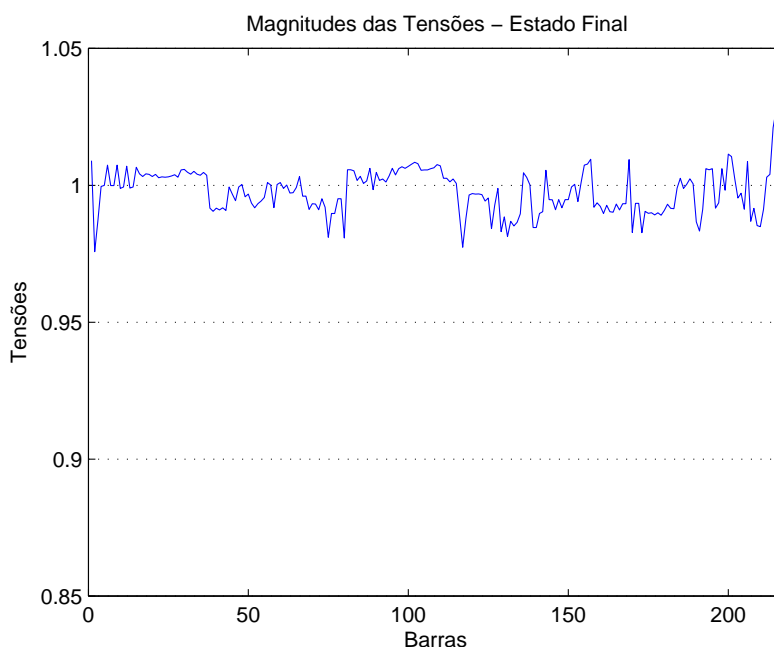


Figura 6.2: Magnitude das Tensões - Estado final

Este método proposto é de fácil aplicação e tem como enfoque abordar os dispositivos de controle no conjunto de regras. As regras visam as características de operação em um centro de controle e baseiam-se no conhecimento e experiência do operador, de modo que mais regras podem ser incluídas no conjunto de acordo com a necessidade da operação. O ideal é um conjunto de regras que vise todas as possíveis decisões e ações de um operador no centro de controle. Um outro ponto que merece destaque é o fato do conjunto de regras ser flexível, podendo-se determinar uma seqüência de regras a serem executadas ou, se for o caso, aplicar apenas uma delas, dependendo da necessidade e conhecimento operacional.

Algumas características observadas nesta aplicação:

- Os controles dos dispositivos para ajuste da magnitude da tensão e da potência reativa são alterados de modo que o perfil de tensão resultante esteja tão próximo quanto possível da condição desejada;

- A operação dos dispositivos de controle da magnitude da tensão e da potência reativa é realizada usando regras nebulosas aproximando-se dos conhecimentos e experiências dos operadores;
- A adaptabilidade das regras é medida pelas funções de pertinência, contribuindo qualitativamente para a compreensão do processo de inferência pelo operador.

O método proposto apresenta bons resultados tais como:

- melhoria do perfil de tensão;
- melhoria no controle da tensão através de um controle global que tem a vantagem de proporcionar um grau de controlabilidade maior sobre as variáveis do sistema;
- melhoria na segurança do sistema, pois esta aumenta com uma melhor utilização das fontes de potência reativa;
- melhoria da operação do sistema, pois um despacho adequado de potência reativa pode oferecer aos operadores do sistema um melhor controle sobre os fluxos de potência reativa, níveis de reserva e perfil de tensão.

## 6.2 Metodologia B

### Controle de Tensão e de Potência Reativa Utilizando Lógica Nebulosa e Particle Swarm

Nesta metodologia foram utilizadas as seguintes redes de energia elétricas: WARD & HALE (6 barras), IEEE-14 barras, IEEE-30 barras e uma rede real com 216 barras pertencente a região de Campinas.

O sistema WARD & HALE, embora seja uma rede muito pequena, foi de fundamental importância durante o desenvolvimento do método, pois permitiu adquirir uma melhor sensibilidade em relação ao comportamento dos controles e possibilitou que os ajustes no algoritmo

fossem efetuados com maior facilidade, uma vez que foi possível comparar os resultados com o trabalho (Mantawy e Al-Ghamdi, 2003), que traz uma aplicação de *particle swarm*, porém neste se faz o uso de um fluxo de carga convencional para calcular as perdas de potência ativa no sistema.

Os coeficientes de ponderação presentes nas características do algoritmo particle swarm são os mesmos utilizados na referência citada (Fukuyama e Yoshida, 2001):  $w_{max} = 0,9$ ;  $w_{min} = 0,4$  e  $c_1 = c_2 = 2,0$  e o número máximo de iterações é igual a 100.

### 6.2.1 Sistema WARD & HALE

Para este teste considera-se todos os limites operacionais conforme (Mantawy e Al-Ghamdi, 2003) e estão apresentados na tabela 6.25. É assumido 16 posições para os taps de transformadores entre os ramos 4-3, 6-5 e considera-se a existência de bancos de capacitores nas barras 4 e 6, para cada barra assume-se  $10 \times 0,05$  MVA e para as magnitudes das tensões nas barras de carga correspondem a  $\pm 5\%$  sobre o valor nominal, ou seja,  $0,95 \leq 1,0 \leq 1,05$  pu.

Tabela 6.25: Limites operacionais das variáveis de controle - WARD & HALE

Controle	Limite inferior	Limite superior	Unidade
$V_1$	1,0	1,1	pu
$V_2$	1,1	1,15	pu
$Q_{G_2}$	-20,0	100	MVA
TAP	0,91	1,11	-
$Q_{Sh}$	0	5	MVA

A tabela 6.26 apresenta o estado da rede para o caso base, ou seja, sem a atuação de qualquer variável de controle, neste caso, as perdas totais de potência ativa é:  $\sum Perdas_{totais} = 11,61$  MW e  $\alpha_{Perdas} = 0,9473$  MW.

Após a aplicação do algoritmo e a atuação dos controles, as perdas totais de potência ativa passou a ser:  $\sum Perdas_{totais} = 8,88$  MW e  $\alpha_{Perdas} = 0,9473$  MW. As tabelas 6.27 e 6.28 apresentam o estado final da rede e os valores finais das variáveis de controle.

Tabela 6.26: Estado da rede - caso base (Ward &amp; Hale)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
1	1,050	0,000	0,000	0,000	-	-
2	1,100	0,000	-6,14	1,9749	34,80	2,2964
3	0,855	0,0097	-13,82	1,1229	-	-
4	0,952	0,0116	-9,92	0,8035	-	-
5	0,901	0,0104	-13,42	1,4721	-	-
6	0,933	0,0139	-12,64	1,0433	-	-

Tabela 6.27: Estado da rede - final (Ward &amp; Hale)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
1	1,100	0,000	0,000	0,000	-	-
2	1,150	0,000	-6,48	1,5952	14,45	2,0945
3	1,037	0,0083	-11,36	0,9001	-	-
4	0,994	0,0086	-8,78	0,7074	4,5	0,3500
5	0,988	0,0087	-10,82	1,2113	-	-
6	0,985	0,0111	-10,83	0,8923	4,5	0,3500

Através da análise dos resultados obtidos, observa-se que foi possível satisfazer o principal objetivo proposto, minimizar as perdas totais de potência ativa, satisfazendo as restrições de operação do sistema, conseqüentemente, realizando um controle sobre as magnitudes das tensões, e fazendo uma comparação com os resultados mostrados em (Mantawy e Al-Ghamdi, 2003), pode-se dizer que o algoritmo *particle swarm* utilizado juntamente com lógica nebulosa (fluxo de carga nebulosa) apresenta um comportamento satisfatório, uma vez que os resultados obtidos

Tabela 6.28: Variáveis de controle - valores finais (Ward &amp; Hale)

Controle	Valor	Unidade
$V_1$	1,1	pu
$V_2$	1,15	pu
$Q_{G_2}$	-14,45	MVA
$TAP_{4-3}$	0,91	-
$TAP_{6-5}$	0,973	-
$Q_{Sh_4}$	4,5	MVA
$Q_{Sh_6}$	4,5	MVA

para a aplicação é muito próximo ao da referência ( $\sum Perdas_{totais} = 8,72$  MW), que trabalha com fluxo de carga desacoplado-rápido.

### 6.2.2 Sistema IEEE-14

Para este sistema teste considera-se que os limites operacionais de tensão para as barras de carga correspondendo a  $\pm 5\%$  sobre o valor nominal, ou seja,  $0,95 \leq 1,0 \leq 1,05$  pu. Para as barras de geração os limites de tensão são de  $\pm 3\%$  e os limites operacionais da potência reativa constam do banco de dados. É assumido 20 posições para os taps de transformadores entre os ramos 4-7, 4-9 e 5-6 e considera-se a existência de bancos de capacitores nas barras 9 e 14, para cada barra assume-se  $3 \times 6$  MVA.

A tabela 6.29 traz os valores dos limites operacionais de tensão e potência reativa usados nos testes para este sistema.

Tabela 6.29: Limites operacionais para as variáveis de controle - IEEE-14 barras

Controle	Limite inferior	Limite superior	Unidade
$V_2$	1,010	1,072	pu
$V_3$	0,980	1,040	pu
$V_6$	1,038	1,120	pu
$V_8$	1,037	1,123	pu
$Q_{G_2}$	-40,0	50,0	MVA
$Q_{G_3}$	0,0	40,0	MVA
$Q_{G_6}$	-6,0	24,0	MVA
$Q_{G_8}$	-6,0	24,0	MVA
TAP	0,90	1,10	-
$Q_{Sh}$	0	18	MVA

Na tabela 6.30 tem-se o estado da rede sem atuação de qualquer dispositivo de controle, sendo que as perdas totais de potência ativa é de  $\sum Perdas_{totais} = 13,40$  MW e  $\alpha_{Perdas} = 0,96$  MW.

Tabela 6.30: Estado da rede - caso base (IEEE-14 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
1	1,060	0,00000	0,00	0,00	-	-
2	1,045	0,00000	-5,66	0,31	31,45	3,5108
3	1,010	0,00000	-16,68	0,69	28,11	2,2870
4	1,005	0,00312	-13,35	0,54	-	-
5	1,006	0,00290	-11,38	0,47	-	-
6	1,070	0,00000	-18,40	0,74	13,62	1,7260
7	1,045	0,00296	-17,18	0,68	-	-
8	1,080	0,00000	-17,18	0,68	18,02	0,7680
9	1,033	0,00443	-19,18	0,76	-	-
10	1,030	0,00435	-19,40	0,77	-	-
11	1,045	0,00254	-19,05	0,76	-	-
12	1,049	0,00160	-19,48	0,77	-	-
13	1,042	0,00229	-19,56	0,78	-	-
14	1,014	0,00525	-20,64	0,82	-	-

Desta forma, após aplicar o algoritmo particle swarm, obteve-se a minimização das perdas totais  $P_{totalis} = 12,23$  MW e  $\alpha_{P_{totalis}} = 0,92$  MW e os seguintes resultados para os dispositivos de controle são apresentados na tabela 6.31, assim como o estado final da rede pode ser observado na tabela 6.32.

Tabela 6.31: Representação dos dispositivos de controle

Controles	Valores	Unidades
$V_2$	1,072 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_3$	1,040 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_6$	1,120 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_8$	1,037 $\alpha = 0,0000$	pu
tap 4-7	0,94	-
tap 4-9	0,93	-
tap 5-6	0,97	-
shunt 9	12,0 $\alpha = 1,26$	MVA
shunt 14	12,0 $\alpha = 1,26$	MVA

Tabela 6.32: Estado da rede - final (IEEE-14 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
1	1,100	0,00000	0,00	0,00	-	-
2	1,072	0,00000	-6,88	0,25	27,48	3,8174
3	1,040	0,00000	-14,37	0,53	34,42	2,2779
4	1,021	0,00220	-11,60	0,43	-	-
5	1,021	0,00201	-10,19	0,37	-	-
6	1,120	0,00000	-15,43	0,57	14,80	1,7791
7	1,038	0,00214	-14,34	0,53	-	-
8	1,037	0,00000	-14,34	0,53	-4,70	0,7228
9	1,039	0,00323	-15,79	0,58	12,0	0,84
10	1,037	0,00319	-15,98	0,59	-	-
11	1,046	0,00186	-15,81	0,59	-	-
12	1,046	0,00120	-16,25	0,60	-	-
13	1,042	0,00170	-16,38	0,60	-	-
14	1,042	0,00392	-17,46	0,62	12,0	0,84

### 6.2.3 Sistema IEEE-30

Para este sistema teste considera-se que os limites operacionais de tensão para as barras de carga correspondendo a  $\pm 5\%$  sobre o valor nominal, ou seja,  $0,95 \leq 1,0 \leq 1,05$  pu. Para as barras de geração os limites de tensão são de  $\pm 3\%$  sobre os valores especificados e os limites operacionais da potência reativa constam do banco de dados. É assumido 20 posições para os taps de transformadores entre os ramos 6-9, 6-10 e 4-12 e considera-se a existência de bancos de capacitores nas barras 10 e 24, assumi-se  $3 \times 6$  MVA como limite máximo para cada banco.

A tabela 6.33 traz os valores dos limites operacionais de tensão e potência reativa usados nos testes para este sistema.

Tabela 6.33: Limites operacionais para as variáveis de controle - IEEE-30 barras

Controle	Limite inferior	Limite superior	Unidade
$V_2$	1,014	1,076	pu
$V_5$	0,980	1,040	pu
$V_8$	0,980	1,040	pu
$V_{11}$	1,050	1,114	pu
$V_{13}$	1,039	1,103	pu
$Q_{G_2}$	-40,0	50,0	MVA
$Q_{G_5}$	-40,0	40,0	MVA
$Q_{G_8}$	-10,0	40,0	MVA
$Q_{G_{11}}$	-6,0	24,0	MVA
$Q_{G_{13}}$	-6,0	24,0	MVA
TAP	0,90	1,10	-
$Q_{Sh_{10}}$	0	18	MVA
$Q_{Sh_{24}}$	0	4,8	MVA

Na tabela 6.34 tem-se o estado da rede sem atuação de qualquer dispositivo de controle, sendo que as perdas totais de potência ativa é de  $\sum Perdas_{totais} = 17,63$  MW e  $\alpha_{Perdas} = 1,62$  MW.

Tabela 6.34: Estado da rede - caso base (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
1	1,0600	0,00000	0,00	0,0000	-	-
2	1,0450	0,00000	-5,52	0,2582	57,13	3,7423
3	1,0210	0,00186	-7,99	0,3301	-	-
4	1,0122	0,00201	-9,64	0,4019	-	-
5	1,0100	0,00000	-14,37	0,5962	35,69	2,3249
6	1,0105	0,00150	-11,36	0,4727	-	-
7	1,0025	0,00154	-13,12	0,5416	-	-
8	1,0100	0,00000	-12,10	0,5122	36,34	2,9279
9	1,0506	0,00244	-14,41	0,5838	-	-
10	1,0444	0,00403	-16,00	0,6438	-	-
11	1,0820	0,00000	-14,41	0,5838	16,27	0,7266
12	1,0572	0,00257	-15,28	0,6185	-	-

continuação, página seguinte...



Continuação - Estado da rede - caso base (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
13	1,0710	0,00000	-15,28	0,6185	10,47	1,1249
14	1,0424	0,00377	-16,17	0,6521	-	-
15	1,0378	0,00419	-16,26	0,6544	-	-
16	1,0446	0,00372	-15,86	0,6393	-	-
17	1,0392	0,00433	-16,16	0,6504	-	-
18	1,0280	0,00506	-16,86	0,6781	-	-
19	1,0253	0,00533	-17,03	0,6846	-	-
20	1,0293	0,00507	-16,83	0,6765	-	-
21	1,0322	0,00498	-16,45	0,6606	-	-
22	1,0328	0,00494	-16,43	0,6598	-	-
23	1,0274	0,00517	-16,65	0,6677	-	-
24	1,0220	0,00584	-16,82	0,6719	-	-
25	1,0177	0,00533	-16,38	0,6644	-	-
26	1,0000	0,00669	-16,80	0,6816	-	-
27	1,0236	0,00434	-15,85	0,6491	-	-
28	1,0070	0,00169	-11,98	0,4964	-	-
29	1,0038	0,00590	-17,08	0,6984	-	-
30	0,9923	0,00679	-17,96	0,7348	-	-

Desta forma, após aplicar o algoritmo particle swarm, obteve-se a minimização das perdas totais  $P_{totais} = 16,75$  MW e  $\alpha_{P_{totais}} = 1,496$  MW e estado final da rede pode ser observado na tabela 6.35 e os resultados para os dispositivos de controle são apresentados na tabela 6.36.

Tabela 6.35: Estado da rede - final (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
1	1,1000	0,00000	0,00	0,0000	-	-
2	1,0700	0,00000	-4,92	0,2407	37,29	3,5368
3	1,0464	0,00173	-7,27	0,3092	-	-
4	1,0343	0,00190	-8,78	0,3775	-	-
5	1,0300	0,00000	-13,32	0,5638	34,30	2,2827
6	1,0265	0,00143	-10,35	0,4455	-	-
7	1,0204	0,00148	-12,08	0,5118	-	-
8	1,0300	0,00000	-11,13	0,4834	37,17	2,8587
9	1,0781	0,00236	-13,16	0,5476	-	-
10	1,0414	0,00387	-14,74	0,6067	9,0	0,63

continuação, página seguinte...

Continuação - Estado da rede - final (IEEE-30 barras)

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$\alpha_\theta$ (rad)	$Q_G$ MVA	$\alpha_{Q_G}$ MVA
11	1,0420	0,00000	-13,16	0,5476	-5,24	0,6915
12	1,0489	0,00246	-14,21	0,5845	-	-
13	1,1000	0,00000	-14,21	0,5845	16,60	1,1068
14	1,0433	0,00363	-15,05	0,6166	-	-
15	1,0449	0,00304	-15,09	0,6186	-	-
16	1,0445	0,00358	-14,69	0,6037	-	-
17	1,0471	0,00317	-14,92	0,6135	-	-
18	1,0452	0,00388	-15,64	0,6407	-	-
19	1,0440	0,00314	-15,78	0,6467	-	-
20	1,0376	0,00489	-15,57	0,6387	-	-
21	1,0388	0,00479	-15,16	0,6231	-	-
22	1,0452	0,00335	-15,15	0,6225	-	-
23	1,0431	0,00499	-15,39	0,6311	-	-
24	1,0362	0,00563	-15,47	0,6349	1,8	0,126
25	1,0331	0,00514	-15,12	0,6287	-	-
26	1,0157	0,00647	-15,53	0,6452	-	-
27	1,0397	0,00418	-14,66	0,6145	-	-
28	1,0239	0,00162	-10,96	0,4683	-	-
29	1,0202	0,00571	-15,85	0,6619	-	-
30	1,0089	0,00658	-16,70	0,6969	-	-

Tabela 6.36: Representação dos dispositivos de controle

Controles	Valores	Unidades
$V_1$	1,100 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_2$	1,070 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_5$	1,300 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_8$	1,300 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_{11}$	1,420 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_{13}$	1,100 $\alpha = 0,0000$	pu
tap 4-7	0,91	-
tap 4-9	0,975	-
tap 5-6	0,94	-
shunt 10	9,0 $\alpha = 0,63$	MVA
shunt 44	1,8 $\alpha = 0,126$	MVA

### 6.2.4 Sistema Real

Para este sistema teste, do mesmo modo que os anteriores, considera-se que os limites operacionais de tensão para as barras de carga correspondendo a  $\pm 5\%$  sobre o valor nominal, ou seja,  $0,95 \leq 1,0 \leq 1,05$  pu. Para as barras de geração os limites de tensão são de  $\pm 3\%$  sobre os valores especificados e os limites operacionais da potência reativa constam do banco de dados. É assumido 20 posições para os taps de transformadores entre os ramos 3-2, 199-75, 204-117, 116-117, 208-127 e 209-127 e considera-se a existência de bancos de capacitores nas barras 60, 143, 185 e 204, assume-se como capacidade máxima  $3 \times 30$  MVA para cada banco.

A tabela 6.37 traz os valores dos limites operacionais de tensão e potência reativa usados nos testes para este sistema.

Tabela 6.37: Limites operacionais para as variáveis de controle - Sistema Real

Controle	Limite inferior	Limite superior	Unidade
$V_{212}$	0,973	1,033	pu
$V_{213}$	0,974	1,034	pu
$V_{214}$	0,972	1,052	pu
$V_{215}$	0,997	1,059	pu
$V_{216}$	0,995	1,057	pu
$Q_{G_2}$	-4,0	4,0	MVA
$Q_{G_5}$	-10,0	10,0	MVA
$Q_{G_8}$	0,0	40,0	MVA
$Q_{G_{11}}$	-2,0	30,0	MVA
$Q_{G_{13}}$	-6,0	106,0	MVA
TAP	0,90	1,10	-
shunt 60	12,0 $\alpha = 0,84$	MVA	
shunt 143	9,0 $\alpha = 0,63$	MVA	
shunt 185	15,0 $\alpha = 1,05$	MVA	
shunt 204	30,0 $\alpha = 2,10$	MVA	

Na tabela 6.38 tem-se o estado da rede sem atuação de qualquer dispositivo de controle, sendo que as perdas totais de potência ativa é de  $\sum Perdas_{totais} = 8,88$  MW e  $\alpha_{Perdas} = 9,7422$  MW.

Tabela 6.38: Estado da rede real - caso base

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)	Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,0090	0,00000	0,0000	-	-	55	0,9956	0,00408	-1,2518	-	-
2	0,9758	0,00309	-3,2382	-	-	56	1,0010	0,00421	-0,8322	-	-
3	0,9871	0,00299	-3,0765	-	-	57	1,0001	0,00419	-0,9017	-	-
4	0,9996	0,00201	-0,6878	-	-	58	0,9919	0,00428	-1,5060	-	-
5	1,0000	0,00199	-0,6563	-	-	59	1,0003	0,00426	-0,8827	-	-
6	1,0074	0,00153	-0,0519	-	-	60	1,0010	0,00421	-0,8309	-	-
7	0,9999	0,00202	-0,6594	-	-	61	0,9989	0,00428	-0,9926	-	-
8	0,9999	0,00202	-0,6591	-	-	62	1,0001	0,00419	-0,9016	-	-
9	1,0074	0,00156	-0,0523	-	-	63	0,9972	0,00431	-1,1194	-	-
10	0,9989	0,00244	-0,7029	-	-	64	0,9973	0,00430	-1,1176	-	-
11	0,9994	0,00241	-0,6711	-	-	65	0,9992	0,00416	-0,9801	-	-
12	1,0070	0,00198	-0,0590	-	-	66	1,0032	0,00511	-0,5569	-	-
13	0,9990	0,00271	-0,6821	-	-	67	0,9960	0,00576	-0,9787	-	-
14	0,9994	0,00268	-0,6513	-	-	68	0,9961	0,00575	-0,9602	-	-
15	1,0066	0,00231	-0,0643	-	-	69	0,9912	0,00616	-1,0337	-	-
16	1,0042	0,00436	-0,0974	-	-	70	0,9933	0,00598	-1,0946	-	-
17	1,0032	0,00415	-0,1551	-	-	71	0,9932	0,00399	-1,4572	-	-
18	1,0042	0,00435	-0,0946	-	-	72	0,9911	0,00415	-1,5991	-	-
19	1,0040	0,00439	-0,0852	-	-	73	0,9951	0,00404	-1,3124	-	-
20	1,0032	0,00418	-0,1441	-	-	74	0,9920	0,00427	-1,5008	-	-
21	1,0040	0,00439	-0,0835	-	-	75	0,9810	0,00861	-1,1745	-	-
22	1,0028	0,00429	-0,1572	-	-	76	0,9597	0,00914	-1,9352	-	-
23	1,0031	0,00450	-0,0379	-	-	77	0,9597	0,00914	-1,9353	-	-
24	1,0030	0,00428	-0,1488	-	-	78	0,9651	0,00890	-1,5046	-	-
25	1,0031	0,00450	-0,0383	-	-	79	0,9651	0,00890	-1,5045	-	-
26	1,0034	0,00425	-0,1211	-	-	80	0,9808	0,00787	-1,5190	-	-
27	1,0039	0,00444	-0,0489	-	-	81	1,0057	0,00455	0,0532	-	-
28	1,0030	0,00046	-0,4439	-	-	82	1,0057	0,00455	0,0548	-	-
29	1,0056	0,00029	-0,3516	-	-	83	1,0053	0,00457	0,0364	-	-
30	1,0058	0,00028	-0,3258	-	-	84	1,0018	0,00470	-0,3094	-	-
31	1,0048	0,00034	-0,3176	-	-	85	1,0033	0,00459	-0,3671	-	-
32	1,0041	0,00265	-0,5412	-	-	86	1,0007	0,00479	-0,5656	-	-
33	1,0051	0,00257	-0,4424	-	-	87	1,0016	0,00471	-0,4931	-	-
34	1,0041	0,00265	-0,5407	-	-	88	1,0062	0,00438	-0,0948	-	-
35	1,0037	0,00288	-0,5849	-	-	89	0,9984	0,00471	-0,7523	-	-
36	1,0047	0,00279	-0,4789	-	-	90	1,0047	0,00451	-0,1680	-	-
37	1,0037	0,00288	-0,5848	-	-	91	1,0018	0,00470	-0,3077	-	-
38	0,9917	0,00396	-1,5791	-	-	92	1,0023	0,00443	-0,6743	-	-
39	0,9905	0,00405	-1,6911	-	-	93	1,0012	0,00474	-0,5217	-	-
40	0,9917	0,00396	-1,5749	-	-	94	1,0034	0,00458	-0,3588	-	-
41	0,9910	0,00401	-1,6306	-	-	95	1,0062	0,00438	-0,0938	-	-
42	0,9918	0,00395	-1,5645	-	-	96	1,0038	0,00455	-0,3318	-	-
43	0,9908	0,00417	-1,6228	-	-	97	1,0061	0,00438	-0,0935	-	-
44	0,9994	0,00427	-0,9881	-	-	98	1,0068	0,00443	0,0366	-	-
45	0,9968	0,00412	-1,1573	-	-	99	1,0062	0,00446	-0,0119	-	-
46	0,9944	0,00417	-1,3274	-	-	100	1,0069	0,00441	0,0607	-	-
47	0,9994	0,00427	-0,9867	-	-	101	1,0077	0,00445	0,2390	-	-
48	1,0003	0,00420	-0,9097	-	-	102	1,0084	0,00439	0,2827	-	-
49	0,9958	0,00420	-1,2648	-	-	103	1,0079	0,00443	0,2536	-	-
50	0,9968	0,00412	-1,1569	-	-	104	1,0055	0,00459	0,0928	-	-
51	0,9935	0,00416	-1,4392	-	-	105	1,0056	0,00458	0,0879	-	-
52	0,9918	0,00399	-1,5534	-	-	106	1,0056	0,00458	0,0895	-	-
53	0,9933	0,00388	-1,4338	-	-	107	1,0061	0,00454	0,1245	-	-
54	0,9943	0,00418	-1,3739	-	-	108	1,0064	0,00456	0,2053	-	-

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)	Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
109	1,0076	0,00447	0,2787	-	-	163	0,9904	0,00615	-0,9055	-	-
110	1,0071	0,00451	0,2512	-	-	164	0,9902	0,00614	-0,8911	-	-
111	1,0026	0,00437	-0,6939	-	-	165	0,9932	0,00604	-0,8567	-	-
112	1,0026	0,00437	-0,6936	-	-	166	0,9910	0,00609	-0,8419	-	-
113	1,0013	0,00437	-0,7082	-	-	167	0,9933	0,00418	-1,4514	-	-
114	1,0023	0,00443	-0,6732	-	-	168	0,9933	0,00418	-1,4526	-	-
115	1,0007	0,00447	-0,7001	-	-	169	1,0094	0,00161	0,2949	-	-
116	0,9891	0,00728	-1,4918	-	-	170	0,9728	0,00519	-3,5431	-	-
117	0,9774	0,00719	-1,4891	-	-	171	0,9934	0,00279	-1,3771	-	-
118	0,9879	0,00736	-1,4988	-	-	172	0,9934	0,00279	-1,3779	-	-
119	0,9965	0,00587	-0,7069	-	-	173	0,9727	0,00519	-3,5447	-	-
120	0,9970	0,00583	-0,6433	-	-	174	0,9905	0,00362	-1,6327	-	-
121	0,9968	0,00589	-0,5734	-	-	175	0,9898	0,00383	-1,7457	-	-
122	0,9969	0,00581	-0,6553	-	-	176	0,9900	0,00366	-1,6712	-	-
123	0,9966	0,00586	-0,6191	-	-	177	0,9892	0,00387	-1,7880	-	-
124	0,9943	0,00589	-0,6919	-	-	178	0,9900	0,00366	-1,6720	-	-
125	0,9954	0,00561	-0,7853	-	-	179	0,9891	0,00388	-1,7921	-	-
126	0,9842	0,00775	-1,4682	-	-	180	0,9908	0,00288	-1,7521	-	-
127	0,9627	0,00512	-3,4520	-	-	181	0,9931	0,00248	-1,5683	-	-
128	0,9689	0,00556	-3,5413	-	-	182	0,9916	0,00277	-1,4213	-	-
129	0,9731	0,00523	-3,5007	-	-	183	0,9915	0,00278	-1,4339	-	-
130	0,9285	0,01163	-3,5939	-	-	184	0,9990	0,00159	-0,8588	-	-
131	0,9413	0,01057	-3,0571	-	-	185	1,0026	0,00105	-0,6375	-	-
132	0,9569	0,00769	-3,5125	-	-	186	0,9989	0,00160	-0,8698	-	-
133	0,9552	0,00942	-2,5054	-	-	187	1,0004	0,00451	-0,7267	-	-
134	0,9665	0,00472	-4,3192	-	-	188	1,0024	0,00443	-0,6526	-	-
135	0,9596	0,00540	-4,9916	-	-	189	1,0006	0,00449	-0,6982	-	-
136	1,0046	0,00450	-0,1833	-	-	190	0,9667	0,00944	-1,4566	-	-
137	1,0029	0,00445	-0,5500	-	-	191	0,9633	0,00973	-1,4388	-	-
138	1,0002	0,00458	-0,6517	-	-	192	0,9612	0,00990	-1,3940	-	-
139	0,9746	0,00864	-1,4151	-	-	193	1,0061	0,00025	-0,2794	-	-
140	0,9746	0,00864	-1,4151	-	-	194	1,0057	0,00027	-0,2510	-	-
141	0,9597	0,00914	-1,9350	-	-	195	1,0061	0,00025	-0,2784	-	-
142	0,9904	0,00405	-1,6948	-	-	196	0,9917	0,00399	-1,5561	-	-
143	1,0055	0,00441	-0,4909	-	-	197	0,9936	0,00228	-1,3644	-	-
144	0,9948	0,00404	-1,3363	-	-	198	1,0061	0,00455	0,1178	-	-
145	0,9947	0,00405	-1,3589	-	-	199	0,9682	0,00851	-1,1783	-	-
146	0,9911	0,00431	-1,5496	-	-	200	1,0114	0,00429	0,6805	-	-
147	0,9948	0,00404	-1,3339	-	-	201	1,0105	0,00447	-0,0826	-	-
148	0,9918	0,00426	-1,5197	-	-	202	1,0025	0,00423	-0,7194	-	-
149	0,9948	0,00597	-0,7852	-	-	203	0,9954	0,00215	-1,1957	-	-
150	0,9948	0,00597	-0,7843	-	-	204	0,9971	0,00583	-0,6427	-	-
151	0,9994	0,00557	-0,4367	-	-	205	0,9913	0,00613	-0,9475	-	-
152	1,0004	0,00543	-0,3285	-	-	206	1,0087	0,00005	-0,0281	-	-
153	0,9941	0,00600	-0,8156	-	-	207	0,9569	0,00769	-3,5126	-	-
154	1,0010	0,00539	-0,2965	-	-	208	0,9916	0,00372	-1,5677	-	-
155	1,0074	0,00464	0,3593	-	-	209	0,9753	0,00513	-3,3793	-	-
156	1,0078	0,00461	0,3926	-	-	210	0,9549	0,00942	-2,4947	-	-
157	1,0095	0,00450	0,5018	-	-	211	0,9912	0,00392	-1,6155	-	-
158	0,9920	0,00600	-0,7427	-	-	212	1,0030	0,00000	-0,6919	1,7283	0,6716
159	0,9936	0,00602	-0,8369	-	-	213	1,0040	0,00000	0,2949	-7,6261	1,2956
160	0,9923	0,00597	-0,7307	-	-	214	1,0210	0,00000	0,0000	33,4754	0,0000
161	0,9897	0,00620	-0,9461	-	-	215	1,0280	0,00000	-0,0826	19,1483	2,8015
162	0,9927	0,00606	-0,8749	-	-	216	1,0260	0,00000	0,6805	71,4779	12,0694

Assim, após aplicar o algoritmo particle swarm, obteve-se a minimização das perdas totais  $P_{totalis} = 7,61$  MW e  $\alpha_{P_{totalis}} = 7,968$  MW e os seguintes resultados para os dispositivos de controle são apresentados na tabela 6.39, assim como o estado final da rede pode ser observado na tabela 6.40.

Tabela 6.39: Representação dos dispositivos de controle

Controles	Valores	Unidades
$V_1$	1,09 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_{212}$	1,010 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_{213}$	1,025 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_{214}$	1,021 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_{215}$	1,045 $\alpha = 0,0000$	pu
$V_{216}$	0,995 $\alpha = 0,0000$	pu
tap 3-2	0,93	-
tap 199-75	0,987	-
tap 204-117	1,00	-
tap 116-117	0,975	-
tap 208-127	1,00	-
tap 209-127	0,958	-
shunt 60	12,0 $\alpha = 0,84$	MVA
shunt 143	9,0 $\alpha = 0,63$	MVA
shunt 185	15,0 $\alpha = 1,05$	MVA
shunt 204	30,0 $\alpha = 2,10$	MVA

Tabela 6.40: Estado final - Sistema Real

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta_{Q_G}$ (rad)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)	(MVA)	Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
1	1,0090	0,00000	0,0000	-	-	19	0,9993	0,00404	0,4938	-	-
2	0,9908	0,00266	-2,6079	-	-	20	0,9984	0,00384	0,4431	-	-
3	0,9762	0,00237	-2,4794	-	-	21	0,9993	0,00404	0,4954	-	-
4	0,9987	0,00181	-0,4305	-	-	22	0,9979	0,00395	0,4433	-	-
5	0,9990	0,00179	-0,4019	-	-	23	0,9983	0,00414	0,5502	-	-
6	1,0058	0,00139	0,1488	-	-	24	0,9980	0,00394	0,4511	-	-
7	0,9989	0,00182	-0,4011	-	-	25	0,9983	0,00414	0,5499	-	-
8	0,9989	0,00182	-0,4009	-	-	26	0,9985	0,00391	0,4765	-	-
9	1,0058	0,00141	0,1519	-	-	27	0,9990	0,00409	0,5401	-	-
10	0,9975	0,00220	-0,3861	-	-	28	1,0036	0,00042	-0,3989	-	-
11	0,9979	0,00217	-0,3571	-	-	29	1,0060	0,00026	-0,3153	-	-
12	1,0049	0,00179	0,2002	-	-	30	1,0061	0,00025	-0,2919	-	-
13	0,9972	0,00245	-0,3246	-	-	31	1,0052	0,00030	-0,2842	-	-
14	0,9975	0,00243	-0,2965	-	-	32	1,0048	0,00242	-0,2518	-	-
15	1,0042	0,00209	0,2377	-	-	33	1,0056	0,00235	-0,1620	-	-
16	0,9995	0,00401	0,4762	-	-	34	1,0048	0,00242	-0,2514	-	-
17	0,9984	0,00381	0,4269	-	-	35	1,0044	0,00263	-0,2704	-	-
18	0,9995	0,00401	0,4789	-	-	36	1,0053	0,00255	-0,1741	-	-

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ $Q_G$ (rad) (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)		Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
37	1,0044	0,00263	-0,2703	-	-	95	1,0022	0,00404	0,5204	-	-
38	0,9939	0,00361	-1,1440	-	-	96	1,0001	0,00419	0,3027	-	-
39	0,9928	0,00369	-1,2443	-	-	97	1,0022	0,00404	0,5207	-	-
40	0,9939	0,00361	-1,1402	-	-	98	1,0016	0,00409	0,6886	-	-
41	0,9932	0,00365	-1,1895	-	-	99	1,0011	0,00412	0,6447	-	-
42	0,9940	0,00360	-1,1308	-	-	100	1,0018	0,00408	0,7107	-	-
43	0,9930	0,00380	-1,1674	-	-	101	1,0015	0,00411	0,9196	-	-
44	1,0006	0,00392	-0,5165	-	-	102	1,0021	0,00406	0,9602	-	-
45	0,9983	0,00378	-0,7003	-	-	103	1,0017	0,00409	0,9331	-	-
46	0,9961	0,00382	-0,8664	-	-	104	0,9997	0,00424	0,7473	-	-
47	1,0006	0,00392	-0,5152	-	-	105	0,9998	0,00423	0,7426	-	-
48	1,0014	0,00386	-0,4457	-	-	106	0,9998	0,00423	0,7440	-	-
49	0,9973	0,00385	-0,7970	-	-	107	1,0002	0,00420	0,7773	-	-
50	0,9983	0,00378	-0,7000	-	-	108	1,0000	0,00422	0,8787	-	-
51	0,9953	0,00381	-0,9737	-	-	109	1,0011	0,00413	0,9464	-	-
52	0,9937	0,00363	-1,1047	-	-	110	1,0007	0,00416	0,9210	-	-
53	0,9951	0,00354	-0,9960	-	-	111	1,0024	0,00402	-0,1901	-	-
54	0,9960	0,00382	-0,9076	-	-	112	1,0024	0,00402	-0,1897	-	-
55	0,9971	0,00374	-0,7978	-	-	113	1,0011	0,00402	-0,2021	-	-
56	1,0026	0,00388	-0,3820	-	-	114	1,0016	0,00408	-0,1495	-	-
57	1,0018	0,00385	-0,4530	-	-	115	1,0001	0,00411	-0,1732	-	-
58	0,9940	0,00391	-1,0415	-	-	116	0,9573	0,00646	-0,5436	-	-
59	1,0014	0,00392	-0,4132	-	-	117	0,9819	0,00663	-0,5415	-	-
60	1,0027	0,00387	-0,3809	-	-	118	0,9567	0,00655	-0,5611	-	-
61	1,0001	0,00393	-0,5219	-	-	119	0,9932	0,00542	0,0772	-	-
62	1,0018	0,00385	-0,4530	-	-	120	0,9937	0,00537	0,1353	-	-
63	0,9987	0,00395	-0,6472	-	-	121	0,9936	0,00543	0,2052	-	-
64	0,9987	0,00395	-0,6456	-	-	122	0,9938	0,00536	0,1218	-	-
65	1,0009	0,00382	-0,5331	-	-	123	0,9934	0,00541	0,1596	-	-
66	1,0049	0,00472	0,0056	-	-	124	0,9916	0,00543	0,0864	-	-
67	0,9966	0,00531	-0,3242	-	-	125	0,9946	0,00516	-0,0197	-	-
68	0,9968	0,00530	-0,3074	-	-	126	0,9812	0,00691	-0,5219	-	-
69	0,9895	0,00567	-0,2874	-	-	127	0,9667	0,00464	-2,7411	-	-
70	0,9935	0,00551	-0,4061	-	-	128	0,9798	0,00481	-2,8682	-	-
71	0,9954	0,00364	-1,0208	-	-	129	0,9746	0,00450	-2,8271	-	-
72	0,9933	0,00378	-1,1459	-	-	130	0,9923	0,01060	-2,8852	-	-
73	0,9971	0,00370	-0,8723	-	-	131	0,9931	0,00962	-2,3738	-	-
74	0,9941	0,00390	-1,0368	-	-	132	0,9817	0,00687	-2,7848	-	-
75	0,9621	0,00786	-0,5293	-	-	133	0,9897	0,00857	-1,8479	-	-
76	0,9878	0,00833	-1,2756	-	-	134	0,9791	0,00405	-3,7761	-	-
77	0,9878	0,00833	-1,2757	-	-	135	0,9876	0,00472	-4,4817	-	-
78	0,9835	0,00809	-0,7791	-	-	136	1,0007	0,00415	0,4207	-	-
79	0,9835	0,00809	-0,7790	-	-	137	1,0014	0,00410	-0,0064	-	-
80	0,9789	0,00706	-0,6471	-	-	138	0,9988	0,00421	-0,0983	-	-
81	1,0001	0,00420	0,6974	-	-	139	0,9874	0,00773	-0,4723	-	-
82	1,0002	0,00420	0,6989	-	-	140	0,9874	0,00773	-0,4723	-	-
83	0,9998	0,00422	0,6820	-	-	141	0,9814	0,00833	-1,2754	-	-
84	0,9980	0,00433	0,3090	-	-	142	0,9927	0,00369	-1,2476	-	-
85	0,9996	0,00423	0,2704	-	-	143	1,0080	0,00408	-0,0156	-	-
86	0,9972	0,00441	0,0886	-	-	144	0,9969	0,00369	-0,8965	-	-
87	0,9981	0,00434	0,1550	-	-	145	0,9968	0,00370	-0,9171	-	-
88	1,0022	0,00404	0,5195	-	-	146	0,9933	0,00394	-1,0839	-	-
89	0,9972	0,00433	-0,1899	-	-	147	0,9969	0,00369	-0,8943	-	-
90	1,0006	0,00416	0,4386	-	-	148	0,9939	0,00389	-1,0568	-	-
91	0,9980	0,00433	0,3106	-	-	149	0,9917	0,00550	-0,0026	-	-
92	1,0016	0,00408	-0,1505	-	-	150	0,9917	0,00550	-0,0018	-	-
93	0,9977	0,00437	0,1288	-	-	151	0,9952	0,00514	0,3344	-	-
94	0,9997	0,00422	0,2780	-	-	152	0,9957	0,00502	0,4403	-	-

Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ $Q_G$ (rad) (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)		Barra	V (pu)	$\alpha_V$ (pu)	$\theta$ (rad)	$Q_G$ (MVA)	$\alpha_{Q_G}$ (MVA)
153	0,9911	0,00553	-0,0359	-	-	185	1,0078	0,00095	-0,6288	-	-
154	0,9962	0,00498	0,4697	-	-	186	1,0001	0,00144	-0,7084	-	-
155	1,0002	0,00430	1,0847	-	-	187	0,9996	0,00414	-0,1922	-	-
156	1,0006	0,00427	1,1154	-	-	188	1,0016	0,00408	-0,1256	-	-
157	1,0022	0,00417	1,2193	-	-	189	0,9998	0,00413	-0,1662	-	-
158	0,9878	0,00552	0,0375	-	-	190	0,9846	0,00847	-0,5145	-	-
159	0,9906	0,00555	-0,0591	-	-	191	0,9859	0,00875	-0,4975	-	-
160	0,9881	0,00550	0,0485	-	-	192	0,9812	0,00890	-0,4541	-	-
161	0,9862	0,00571	-0,1609	-	-	193	1,0064	0,00023	-0,2497	-	-
162	0,9899	0,00558	-0,1005	-	-	194	1,0060	0,00024	-0,2237	-	-
163	0,9869	0,00566	-0,1238	-	-	195	1,0064	0,00023	-0,2487	-	-
164	0,9865	0,00566	-0,1048	-	-	196	0,9937	0,00364	-1,1071	-	-
165	0,9902	0,00556	-0,0807	-	-	197	0,9953	0,00206	-1,1184	-	-
166	0,9872	0,00560	-0,0597	-	-	198	1,0002	0,00420	0,7700	-	-
167	0,9951	0,00382	-0,9848	-	-	199	0,9859	0,00777	-0,5332	-	-
168	0,9951	0,00382	-0,9859	-	-	200	1,0035	0,00398	1,3874	-	-
169	1,0207	0,00149	0,7975	-	-	201	1,0124	0,00415	0,4075	-	-
170	0,9814	0,00446	-2,8959	-	-	202	1,0033	0,00390	-0,2515	-	-
171	0,9952	0,00252	-1,0701	-	-	203	0,9969	0,00194	-0,9655	-	-
172	0,9952	0,00252	-1,0708	-	-	204	0,9937	0,00537	0,1360	-	-
173	0,9761	0,00446	-2,8976	-	-	205	0,9886	0,00565	-0,1781	-	-
174	0,9927	0,00329	-1,2417	-	-	206	1,0088	0,00004	-0,0209	-	-
175	0,9927	0,00348	-1,3376	-	-	207	0,9762	0,00687	-2,7849	-	-
176	0,9923	0,00332	-1,2765	-	-	208	0,9936	0,00339	-1,1421	-	-
177	0,9921	0,00352	-1,3759	-	-	209	0,9799	0,00440	-2,6795	-	-
178	0,9923	0,00332	-1,2773	-	-	210	0,9984	0,00857	-1,8372	-	-
179	0,9920	0,00352	-1,3796	-	-	211	0,9934	0,00357	-1,1837	-	-
180	0,9955	0,00260	-1,4985	-	-	212	1,0100	0,00000	0,0864	3,6806	0,3234
181	0,9981	0,00223	-1,3693	-	-	213	1,0250	0,00000	0,7975	6,2175	1,2217
182	0,9937	0,00250	-1,1400	-	-	214	1,0210	0,00000	0,0000	33,4754	0,0000
183	0,9935	0,00252	-1,1514	-	-	215	1,0450	0,00000	0,4075	36,1960	2,6440
184	1,0002	0,00143	-0,6984	-	-	216	0,9950	0,00000	1,3874	-3,6448	1,8541

Nas figuras 6.3 e 6.4 a seguir são apresentados os gráficos com os estados da rede real para o caso base e após a aplicação do algoritmo de controle, sendo possível observar o comportamento das magnitudes das tensões.



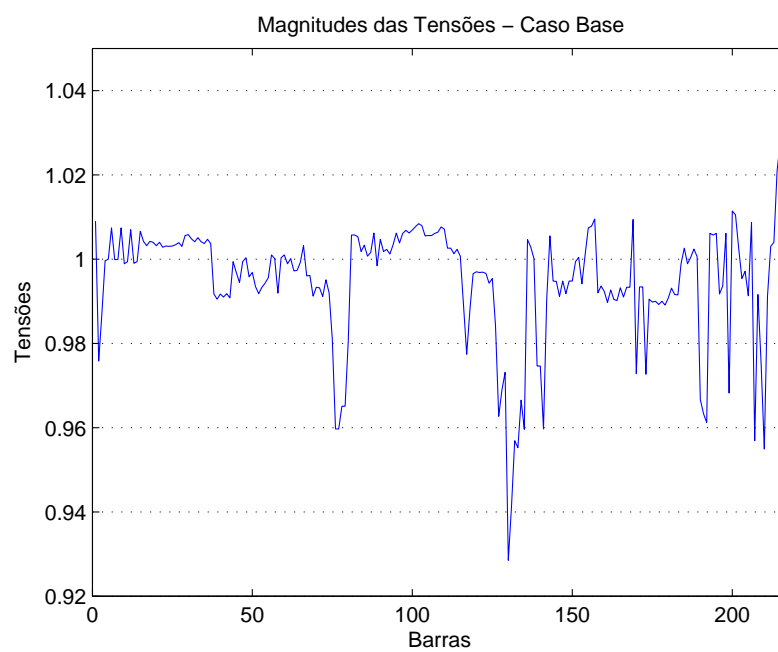


Figura 6.3: Magnitudes das Tensões - Caso Base

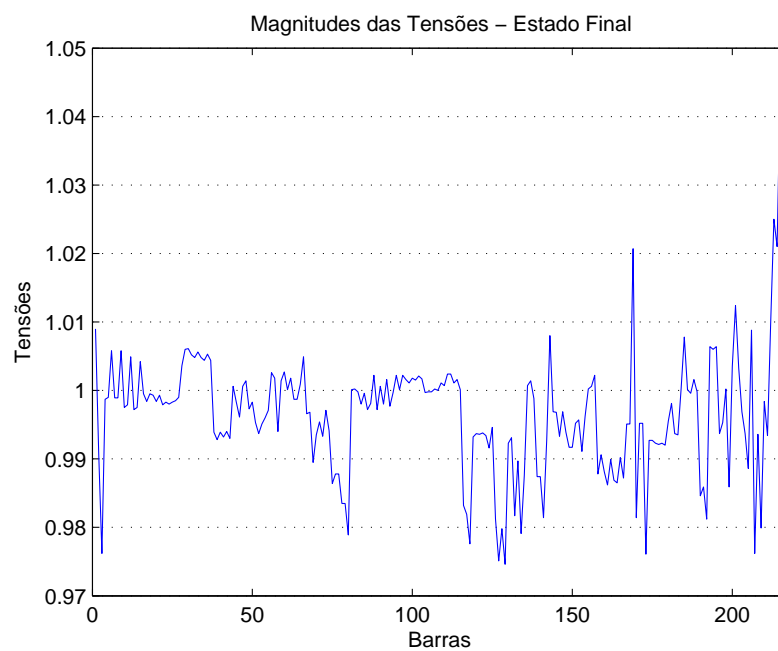


Figura 6.4: Magnitude das Tensões - Estado final

Com a aplicação do algoritmo particle swarm ao sistema teste constatou-se a possibilidade de otimizar as perdas do sistema através da combinação ótima das tensões de geração, dos taps de transformadores e dos níveis de compensação existente no sistema.

O método proposto neste trabalho é de fácil aplicação e aborda os dispositivos de controle disponíveis em cada rede de energia elétrica simultaneamente em cada iteração do algoritmo particle swarm.

O método proposto apresenta bons resultados com melhorias:

- no perfil de tensão;
- no controle da tensão através de um controle global que tem a vantagem de proporcionar um grau de controlabilidade maior sobre as variáveis do sistema;
- na segurança do sistema, pois esta aumenta com uma melhor utilização das fontes de potência reativa;
- na operação do sistema, pois um despacho adequado de potência reativa pode oferecer aos operadores do sistema um melhor controle sobre os fluxos de potência reativa, níveis de reserva e perfil de tensão.

Através da análise dos resultados obtidos neste capítulo, as duas metodologias apresentam diferentes resultados para os mesmos sistemas, o que já era esperado, considerando que as metodologias foram propostas visando a melhoria do perfil de tensão, porém através de métodos completamente distintos, sendo que a primeira metodologia utiliza-se um sistema baseado em um conjunto de regras nebulosas, já o segundo método faz uso de uma técnica de otimização com o objetivo de minimizar as perdas dos sistemas, como detalhado no capítulo 5.

## Capítulo 7

# Conclusões

Devido ao crescente aumento da demanda de energia elétrica e ao atraso de investimento na expansão dos sistemas de energia elétrica (SEE), a operação destes sistemas está cada vez mais próxima de seus limites operacionais, contribuindo para maior complexidade dos SEE. Neste sentido, para satisfazer as rígidas condições de operação, um gerenciamento do perfil de tensão e fluxo de potência tem se tornado cada vez mais importante para as concessionárias, de modo a aumentar a segurança operacional dos sistemas e otimizar o uso de fontes de potência reativa, visando suprir aos consumidores energia dentro de determinados padrões de qualidade e confiabilidade.

Manter as magnitudes das tensões em níveis aceitáveis, garantindo o suprimento de energia, é uma das exigências mínimas e para isto, as condições de operação podem requerer o controle de fluxo de potência reativa nas ligações, sendo imprescindível a atuação de dispositivos de controle de potência reativa e da magnitude da tensão. É fato que algumas magnitudes das tensões podem violar um dos limites, superior ou inferior, devido a alguns distúrbios de operação e/ou mudanças de configuração das redes elétricas. Estas condições podem ser aliviadas e as magnitudes das tensões podem manter-se dentro de seus limites permitidos através da realocação de potência reativa no sistema como por exemplo, ajuste da tensão nos geradores, alteração de

tap de transformadores (LTC) e outros possíveis controles.

Diante disso, o objetivo principal desta pesquisa consistiu no desenvolvimento de metodologias com o objetivo de monitorar o perfil de tensão, mantendo-o dentro dos limites operativos, visando não perder a qualidade de fornecimento de energia elétrica.

O primeiro método trata-se de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão dos operadores nos centros de controle, baseada em um conjunto de regras nebulosas, o qual é a base do sistema de inferência fuzzy (ou nebulosa) que por sua vez se fundamenta na teoria de conjuntos nebulosos. Considerando que grandezas como magnitude da tensão e potências nas barras podem variar ao longo do dia, pode-se então tratá-las como grandezas nebulosas, diferentemente dos métodos tradicionais que consideram estas grandezas constantes. A lógica nebulosa pode ser eficientemente aplicada em problemas de controle de tensão e de potência reativa devido à complexidade e à natureza não-linear da relação entre potência reativa e tensão.

Aplicação desta metodologia é extremamente simples e tem como enfoque abordar os dispositivos de controle no conjunto de regras. As regras visam as características de operação em um centro de controle e baseiam-se no conhecimento e experiência do operador, de modo que mais regras podem ser incluídas no conjunto de acordo com a necessidade da operação. O ideal é um conjunto de regras que vise todas as possíveis decisões e ações de um operador no centro de controle. Um outro ponto que merece destaque é o fato do conjunto de regras ser flexível, podendo-se determinar uma seqüência de regras a serem executadas ou, se for o caso, aplicar apenas uma delas, dependendo da necessidade e conhecimento operacional.

Algumas características observadas nesta aplicação:

- Os controles dos dispositivos para ajuste da magnitude da tensão e da potência reativa são alterados de modo que o perfil de tensão resultante esteja tão próximo quanto possível da condição desejada;
- A operação dos dispositivos de controle da magnitude da tensão e da potência reativa é

realizada usando regras nebulosas aproximando-se dos conhecimentos e experiências dos operadores;

- A adaptabilidade das regras é medida pelas funções de pertinência, contribuindo qualitativamente para a compreensão do processo de inferência pelo operador.

Considerando que o problema de controle de tensão e de potência reativa apresenta características de natureza não-linear e que envolve variáveis de controle contínuas e discretas, foi desenvolvido um segundo método, o qual utiliza lógica nebulosa em conjunto com a técnica de otimização particle swarm. Este método mostra a possibilidade de incorporar lógica nebulosa em algoritmos baseados em busca, possibilitando otimizar as perdas do sistema através da combinação ótima das tensões de geração, dos taps de transformadores e dos níveis de compensação existente no sistema, satisfazendo as restrições de operação, e garantindo que o perfil de tensão mantenha-se dentro dos limites operativos com uma melhor utilização das fontes de potência reativa.

O método proposto neste trabalho é de fácil aplicação e aborda os dispositivos de controle disponíveis em cada rede de energia elétrica simultaneamente em cada iteração do algoritmo particle swarm.

Em linhas gerais, as duas metodologias propostas apresentam bons resultados com melhorias:

- no perfil de tensão;
- no controle da tensão através de um controle global que tem a vantagem de proporcionar um grau de controlabilidade maior sobre as variáveis do sistema;
- na segurança do sistema, pois esta aumenta com uma melhor utilização das fontes de potência reativa;
- na operação do sistema, pois um despacho adequado de potência reativa pode oferecer aos operadores do sistema um melhor controle sobre os fluxos de potência reativa, níveis de reserva e perfil de tensão.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Um sistema baseado em regras nebulosas também pode ser aplicado para a recomposição do sistema elétrico, tendo como objetivo determinar uma sequência adequada de manobras para o restabelecimento da área desenergizada atendendo o máximo de carga no menor tempo possível. Pode ser considerada, no conjunto de regras nebulosas, a capacidade de representar a natureza bastante diversa das inúmeras tarefas que são executadas durante o processo de recomposição, envolvendo atividades de caráter técnico (como, por exemplo, a atuação em controles e a atenção aos limites dos equipamentos e linhas de transmissão), gerencial (como a coordenação da interligação de diferentes áreas geo-elétricas), logístico (como o deslocamento de viaturas e equipes em campo) e estratégico (como a representação de cargas prioritárias para reenergização). A utilização de outras funções de pertinências também pode ser considerada.

Em relação à metodologia que utiliza técnica de otimização *particle swarm*, sugere-se utilizar outras funções objetivos, como por exemplo, a maximização das reservas de potência reativa, que pode ser definida como sendo a diferença entre a geração atual de potência reativa e o limite máximo de potência reativa. O objetivo desta aplicação deverá considerar que após a otimização, alguns geradores passam a consumir potência reativa ao invés de fornecer, fazendo com que as reservas de MVA do sistema aumentem.

Outra sugestão de trabalho futuro pode ser a utilização de outras técnicas de otimização, que também utilizem busca heurística.

# Referências Bibliográficas

Abdul-Rahman, K. H. e Shahidehpour, S. M. - A fuzzy - based optimal reactive power control, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 2, p. 662–670, 1993.

Bansal, R. C. - Bibliography on the fuzzy set theory applications in power systems (1994-2001), *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 18, n. 4, p. 1291–1299, 2003.

Bansal, R. C. , Bhatti, T. S. e Kothari, D. P. - Artificial intelligence techniques for reactive power / voltage control in power systems: A review, *International Journal of Power and Energy Systems*, v. 23, n. 2, p. 81–89, 2003.

Bjelogrlic, M. , Calovic, M. S. , Babic, B. S. e Ristanovic, P. - Application of newton's optimal power flow in voltage/reactive power control, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 4, p. 1447–1454, 1990.

Chang, S.-K. , Marks, G. E. e Kato, K. - Optimal real-time voltage control, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 3, p. 750–758, 1990.

Coath, G. , Al-Dabbagh, M. e Halgamuge, S. K. - Particle swarm optimization for reactive power and voltage control with grid-integrated wind farms, *IEEE/PES General Meeting*, v. 1, p. 303–308, 2004.

Conejo, A. e Aguilar, M. J. - Secondary voltage control: Nonlinear selection of pilot buses, design of an optimal control law, and simulation results, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v. 1, p. 77–81, 1998.

- Correa, S. S. . C. - *Apostila:Lógica Nebulosa - INPE*, 1999.
- Costa, A. S. - *Apostila: Dinâmica e Controle de Sistemas de Potência - [www.lapspot.ufsc.br/simoes/dcsp.html](http://www.lapspot.ufsc.br/simoes/dcsp.html) - último acesso: 15/03/2007*, 2002.
- Cutsem, T. V. e Vournas, C. - *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Liège: Academic Publishers, 1998.
- de Albuquerque, V. O. - *Controle coordenado de tensão e potência reativa*, Tese de mestrado, Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, 2002.
- Deng, Y. , Ren, X. , Zhao, C. e Zhao, D. - A heuristic and algorithmic combined approach for reactive power optimization with time-varying load demand in distribution systems, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 17, n. 4, p. 1068–1072, 2002.
- Dhar, S. B. - Power system long-range decision analysis under fuzzy environment, *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, v. 2, p. 585–596, 1979.
- El-Harwary, M. E. - Electric power applications of fuzzy systems, *IEEE Press*, v. 1, p. 1–11, 1998.
- Elgerd, O. I. - *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*, McGraw-Hill, 1982.
- Esmin, A. A. A. , Lambert-Torres, G. e Zambroni, A. C. - A hibrid particle swarm optimization applied to loss power minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, p. 859–866, 2005.
- Fellei, W. - *Introdução à Teoria das Probabilidades e suas Aplicações*, Edgard Blucher, 1976.
- Fukuyama, Y. - *Fundamentals of Particle Swarm Optimization Techniques*, IEEE PES - Modern Heuristic Optimizations Techniques with Applications o Power Systems, 2002.
- Fukuyama, Y. e Yoshida, H. - A particle swarm optimization for reactive power and voltage control in electric power systems, *IEEE Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, v. 1, p. 87–93, 2001.



- Hano, I. , tamura, Y. , Narita, S. e Matsumoto, K. - Real time control of system voltage and reactive power, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-88, n. 10, p. 1544–1559, 1969.
- He, S. , Wen, J. Y. , Prempain, E. , Hu, Q. H. , Fitch, J. e Mann, S. - An improved particle swarm optimization for optimal power flow, *International Conference on Power System Technology - POWERCON*, p. 1633–1637, 2004.
- Hobson, E. - Network constrained reactive power control using linear programming, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-99, n. 3, p. 868–877, 1980.
- Hu, Z. , Xang, X. , Chen, H. e Taylor, G. A. - Volt/var control in distribution systems using a time-interval based approach, *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, v. 150, n. 5, p. 548–554, 2003.
- Júnior, W. L. F. - *Um estudo sobre coordenação e ajuste de transformadores com mudança de tap sob carga e de bancos de capacitores para suporte das ações de controle coordenado de tensão e potência reativa*, Tese de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande Do Sul, 2002.
- Kennedy, J. e Eberhart, R. - Particle swarm optimization, *IEEE Proceedings International Conference on Neural Networks*, v. 4, p. 1942–1948, 1998.
- Kundur, P. - *Power System Stability and Control*, 1. ed. ed., 1994.
- Lagonotte, P. , Sabonnadière, J. C. , Léost, J. Y. e Paul, J. P. - Structural analysis of the electrical system: Application to secondary voltage control in france, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 4, n. 2, p. 479–486, 1989.
- Liang, R.-H. e Wang, Y.-S. - Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 2, p. 610–618, 2003.
- Lima, M. M. P. - *Nova concepção para fluxo de carga fuzzy incorporando função de pertinência sinusoidal*, Tese de mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2000.

- Lu, F.-C. e Hsu, Y.-Y. - Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 12, n. 2, p. 681–688, 1997.
- Mamandur, K. R. C. - Emergency adjustment to var control variables to alleviate over- voltages, under-voltages, and generator var limit violations, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 5, p. 1040–1047, 1982.
- Mamandur, K. R. C. e Chenoweth, R. D. - Optimal control of reactive power flow for improvements in voltage profile and for real power loss minimization, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-100, n. 7, p. 3185–3194, 1981.
- Mantawy, A. H. e Al-Ghamdi, M. S. - A new reactive power optimization algorithm, *PowerTech Conference*, 2003.
- Mantovani, J. R. - *Um Modelo Heurístico para Solução do Problema de Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- Marques, A. B. , Taranto, G. N. e Falcão, D. M. - A knowledge-based systems for supervision and control of regional voltage profile and security, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 20, n. 4, p. 400–407, 2005.
- Miller, T. J. E. - *Reactive Power Control in Electric Systems*, Neew York: John Wiley & Sons, Inc., 1982.
- Miranda, V. e Fonseca, N. - Epso -evolutionay particle swarm optimization, a new algorithm with application in power systems, *IEEE/PES Transaction and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*, p. 745–750, 2002.
- Momoh, J. A. Ma, X. W. e Tomsovic, K. - Overview and literature survey of fuzzy set theory in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 10, n. 3, p. 1676–1690, 1995.
- Morison, K. , Wang, L. e Kundur, P. - Power system security assessment, *IEEE Power & Energy Magazine*, v. 2, n. 5, p. 30–39, 2004.

- Narita, S. e Hamman, M. S. A. A. - A computational algorithm for real-time control of system voltage and reactive power: Part i - formulation of problem and part ii: Algorithm of optimization, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-90, n. 6, p. 2495–2508, 1971.
- Osman, I. H. - Heuristics for combinatorial optimization problems: Developments and new directions, *Proceedings of the First Seminar on Information Technology and Applications, Marfield Conference Centre, Leicester, September, 1991*.
- Paul, J. P. , Leost, J. Y. e Tesseron, J. M. - Survey of the secondary voltage control in france: Present realization and investigations, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 2, n. 2, p. 505–511, 1987.
- Pedrycz, W. e Gomide, F. - *An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design*, MIT Press, 1998.
- Peschon, J. , Piercy, D. S. , Tinney, W. F. , Tveit, O. J. e Cuénod, M. - Optimum control of reactive power flow, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-87, n. 1, p. 40–48, 1968.
- Salama, M. M. A. , Laframboise, J. R. P. R. , Ferland, G. e Chikhani, A. Y. - An expert system for reactive power control of a distribution system part 2: System implementation, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 10, n. 2, p. 1433–1441, 1995.
- Shoults, R. R. e Chen, M.-S. - Reactive power control by least squares minimization, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-95, n. 1, p. 325–334, 1976.
- Song, Y.-H. e Johns, A. T. - Applications of fuzzy logic in power systems: Part 1 general introduction to fuzzy logic, *Power Engineering Journal*, v. 1, p. 219–222, 1997.
- Sárfi, R. J. , Salama, M. M. A. e Chikhani, A. Y. - Applications of fuzzy sets theory in power systems planning and operation: A critical review to assist in implementation, *Electric Power Systems Research*, v. 39, p. 89–101, 1996.

- Srinivasan, D. , Liew, A. C. e Chang, C. S. - Applications of fuzzy systems in power systems, *Electric Power Systems Research*, v. 35, p. 39–45, 1995.
- Stenvenson, W. D. - *Elementos de Análise de Sistema de Potência*, McGraw-Hill, 1977.
- Su, C.-T. e Lin, C.-T. - A new fuzzy control approach to voltage profile enhancement for power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 3, p. 1654–1659, 1996.
- Su, C.-T. e Lin, C.-T. - Voltage/reactive power control via fuzzy linear programming approach, *Cybernetics and Systems: An International Journal*, v. 30, p. 213–226, 1999.
- Taranto, G. N. , Marins, N. , Falcão, D. M. , Martins, A. C. B. e dos Santos, M. G. - Benefits of applying secondary voltage control schemes to the brasilian systems, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, v. 1, n. 2, p. 937–942, 2000.
- Taylor, C. W. - *Power Systems Voltage Stability*, Palo Alto: McGraw-Hill, 1994.
- Tomsovic, K. - A fuzzy linear programming approach to the reactive/voltage control problem, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 287–293, 1992.
- Venkatesh, B. , Sadasivam, G. e Khan, M. A. - Fuzzy logic based successive lp method for reactive power optimization, *Electric Machines and Power Systems*, v. 27, p. 1141–1160, 1999.
- Venkatesh, B. , Sadasivam, G. e Khan, M. A. - Optimal reactive power planning method enhancing voltage stability margin using successive multiobjective fuzzy lp method, *Electric Machines and Power Systems*, v. 28, p. 433–449, 2000.
- Vu, H. , Pruvot, P. , Launay, C. e Harmand, Y. - An improved voltage control on large-scale power system, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 3, p. 1295–1303, 1996.
- Wang, H. F. - Multi-agent coordination for the secondary voltage control in power system contingencies, *IEE Proceedings Generations, Transmission and Distribution*, v. 148, n. 1, p. 61–66, 2001.
- Weddy, B. M. e Cory, B. J. - *Electric Power Systems*, 1998.

Yokoyama, R. , Niimura, T. e Nakanishi, Y. - A coordinated control of voltage and reactive power by heuristic modeling and approximate reasoning, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 2, p. 636–643, 1993.

Yoshida, H. , Kawata, K. , Fukuyama, Y. , Takayama, S. e Nakanishi, Y. - A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 4, p. 1232–1239, 2000.

Zadeh, L. A. - Fuzzy sets, *Information and Control*, v. 8, p. 338–353, 1965.

Zadeh, L. A. - Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. SMC-1, p. 28–44, 1973.

Zadeh, L. A. - Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and System*, v. 1, p. 3–28, 1978.

Zhang, W. e Liu, Y. - Reactive power optimization based on pso in a practical power system, *IEEE/PES General Meeting*, v. 1, p. 239–243, 2004.

Zhu, J. Z. e Xiong, X. F. - Optimal reactive power control using modified interior point method, *Electric Power Systems Research*, v. 66, n. 2, p. 187–192, 2003.

## Apêndice A

# Fluxo de Carga Nebuloso

O fluxo de carga nebuloso (FCN) utilizado neste trabalho segue o modelo desenvolvido por (Lima, 2000). Neste modelo é apresentado uma proposta para inserir as imprecisões nos modelos dos fluxos de carga através de uma função de pertinência em forma de sino (sinusoidal) para representar os números nebulosos. Segundo o autor, com a utilização desta função não é necessário utilizar técnicas de cortes de nível e linearização, já que os cálculos nebulosos com esta função são efetuados com operadores desenvolvidos para esta função.

Uma alternativa ao tratamento da incerteza é o uso de probabilidades ou de possibilidades. Enquanto no primeiro caso, tem-se o uso dos modelos tradicionais de distribuição probabilística, no segundo, faz-se uso da lógica nebulosa (*fuzzy logic*).

Os modelos de probabilidades são implementados através de funções de distribuição de probabilidades de uma variável  $\delta$  sobre um domínio  $D$ , que atribui a cada valor  $d \in D$  um valor entre 0 e 1, indicando a probabilidade de  $\delta$  ser igual a  $d$ . Nestes modelos, a soma das probabilidades deve ser igual a 1 (ao contrário dos modelos baseados em funções de distribuição de possibilidades).

Por outro lado, os modelos baseados em possibilidades fundamentam-se na teoria dos con-

juntos nebulosos (*fuzzy sets*)(Zadeh, 1965), aqueles onde cada elemento tem associado um valor no intervalo de 0 a 1, indicando o seu peso ou grau de pertinência ao conjunto. A Teoria de Possibilidades (Zadeh, 1978) tem-se mostrado útil para o desenvolvimento de técnicas computacionais para o tratamento da informação incerta através de modelos matemáticos que aliam a expressividade com a flexibilidade. Nestes modelos, a informação proveniente de uma base de conhecimento a respeito do verdadeiro valor de uma variável  $x$  em um universo de discurso  $X$ , passa a ser codificada sob a forma de uma distribuição de possibilidades, representada por:  $\sigma : X \rightarrow [0, 1]$ . Para qualquer  $x_i \in X$ ,  $\sigma(x_i)$  representa o grau de possibilidade de ocorrer  $x = x_i$ . Dessa forma, uma distribuição de possibilidades associada à variável  $x$  pode ser interpretada como uma função de pertinência de um conjunto nebuloso dos valores possíveis de  $x$  (Zadeh, 1978).

A distribuição de possibilidades será igual a função de pertinência para uma mesma variável. Toda a fundamentação teórica para esta afirmação pode ser encontrada na referência citada acima. A Teoria de Possibilidades trouxe uma grande flexibilidade no momento de codificar a informação incerta da variável de interesse. Assim cada variável pode ter a sua distribuição de possibilidades. Por exemplo, cada injeção de potência ativa terá a sua própria distribuição de possibilidades e não ficará atrelada a uma distribuição geral feita para a potência ativa nas barras. Isto permite uma maior versatilidade e expressividade a variável em questão, no momento de ser trabalhada e analisada.

Antes de comentar sobre o fluxo de carga nebuloso sinusoidal é apresentado um comentário sobre as operadores nebulosas e seno e cosseno nebuloso que são utilizados nas equações com cálculo nebulosos.

## Operadores Nebulosos

Sejam os números nebulosos representados por  $A(m_A, \alpha_A)$  e  $B(m_B, \alpha_B)$ , com os quais podem ser efetuadas as seguintes operações matemáticas:

- adição

$$C(m_C, \alpha_C) = A \oplus B \quad (\text{A.1})$$

$$m_C = m_A + m_B \quad \alpha_C = \alpha_A + \alpha_B$$

- subtração

$$D(m_D, \alpha_D) = A \ominus B \quad (\text{A.2})$$

$$m_D = m_A - m_B \quad \alpha_D = | \alpha_A - \alpha_B |$$

Para a multiplicação são propostos dois tipos de operadores, denominados de função faixa estreita e função faixa larga (Lima, 2000):

- função faixa estreita

$$E(m_E, \alpha_E) = A \underline{\otimes} B \quad (\text{A.3})$$

$$m_E = m_A \cdot m_B \quad \alpha_E = \alpha calc(2)$$

onde  $\alpha calc(2)$  é o segundo elemento do vetor:

$$\alpha calc(2) = ord[ | m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, \dots$$

$$| m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) | ]$$

$ord$  é a função de ordenação do vetor em ordem crescente.



- função faixa larga

$$E(m_E, \alpha_E) = A \otimes B \quad (\text{A.4})$$

$$m_E = m_A \cdot m_B \quad \alpha_E = \alpha calc(3)$$

onde  $\alpha calc(3)$  é o terceiro elemento do vetor:

$$\alpha calc(3) = ord[| m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B - \alpha_B)) |, \dots$$

$$| m_E - ((m_A - \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) |, | m_E - ((m_A + \alpha_A) \cdot (m_B + \alpha_B)) |]$$

Pode-se constatar que o parâmetro  $\alpha$  tem diferentes comportamentos com relação aos fluxos e perdas nos ramos e às potências geradas nas barras. Tal fato é devido às expressões para o cálculo destas variáveis possuírem diferentes quantidades de multiplicações (Lima, 2000). A referência (Pedrycz e Gomide, 1998) comenta que a obtenção de uma função que represente operações de multiplicação nem sempre é possível. Operações consecutivas com números nebulosos impõem restrições pois, da mesma maneira como ocorrem erros em processamentos iterativos com números decimais, o mesmo ocorre com os números nebulosos e com maior intensidade (Pedrycz e Gomide, 1998).

Constatou-se (Lima, 2000) que o problema seria resolvido se o valor de  $\alpha$  fosse restringido. Assim, para os cálculos dos fluxos nos ramos utiliza-se a função que restringe o  $\alpha$  durante os cálculos (função faixa estreita) e para as perdas na transmissão e as potências geradas nas barras, utiliza-se a função que permite ao  $\alpha$  assumir valores um pouco maiores durante os cálculos (função faixa larga).

## Seno e Cosseno Nebuloso

A necessidade de definir um seno e um cosseno nebuloso deve-se ao fato de ao se executar os cálculos de fluxos de potência nos ramos, os valores obtidos não serem satisfatórios quando é utilizada a metodologia convencional (Lima, 2000). Deste modo, são executados os cálculos de  $sen(\theta_m, \alpha_\theta)$  e  $cos(\theta_m, \alpha_\theta)$  de forma aproximada, calculando-se o cosseno ou o seno para o valor mínimo do ângulo ( $sen(\theta_m - \alpha_\theta)$ ) e para o valor máximo ( $sen(\theta_m + \alpha_\theta)$ ), fazendo-se uma média dos desvios destes valores com relação ao valor calculado ( $sen(\theta_m)$ ), tomando este valor como o valor de  $\alpha$  para a operação em questão, como mostrado a seguir:

$$\theta_{max} = \theta_m + \alpha_\theta \quad (A.5)$$

$$\theta_{min} = \theta_m - \alpha_\theta$$

$$sen(\theta_m, \alpha_\theta) = (m_{final}, \alpha_{final}) \quad (A.6)$$

onde

$$m_{final} = sen(\theta_m) \quad (A.7)$$

$$\alpha_{final} = [| sen(\theta_{max}) | - | sen(\theta_m) |] + [| sen(\theta_m) | - | sen(\theta_{min}) |] / 2$$

Para o cosseno adota-se o mesmo procedimento.

## Fluxo de Carga Nebuloso Sinusoidal - FCNS

O FCN foi desenvolvido visando obter uma distribuição de possibilidades para os resultados e utilizar os operadores nebulosos da função sinusoidal para o maior número de cálculos efetuados. Esta função de pertinência permitiu a simplificação dos cálculos na forma nebulosa, isso devido à utilização de operadores nebulosos.

O primeiro passo para obter as distribuições de possibilidades para os resultados é simular um fluxo de carga Newton-Raphson convencional com os valores médios das distribuições de possibilidades dos dados fornecidos para o sistema, que para a função sinusoidal correspondem aos valores de  $m$  das distribuição de possibilidades, referentes aos dados de potência ativa e reativa injetadas (figura A.1). A partir desta simulação, obtém-se os valores de  $\underline{V}_m$  e  $\underline{\theta}_m$ .

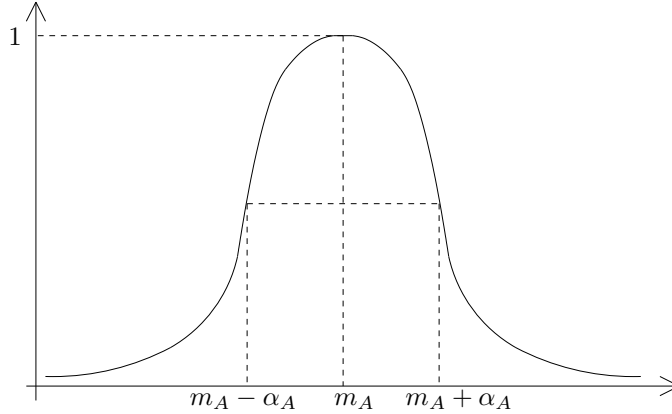


Figura A.1: Função Sinusoidal

Os valores  $\underline{V}_m$  e  $\underline{\theta}_m$  são considerados agora os valores de maior grau de pertinência para formar as distribuições de possibilidades para estas variáveis, ou seja, são os respectivos valores de  $m$ . Resta agora o cálculo dos desvios ( $\alpha$ ) destas variáveis.

Os desvios para  $\underline{V}_m$  e  $\underline{\theta}_m$  são obtidos multiplicando-se a matriz Jacobiana obtida na última iteração pelos valores dos desvios das injeções líquidas das potências de entrada ( $\alpha_{Pliq}$  e  $\alpha_{Qliq}$ ).

Os desvios líquidos para as injeções de potência ativa ( $\alpha_{P_k}^{liq}$ ) e reativa ( $\alpha_{Q_k}^{liq}$ ) são obtidos a partir dos desvios fornecidos para as potências ativa ( $\alpha_{P_k}$ ) e reativa ( $\alpha_{Q_k}$ ) nas barras, tendo como referência o banco de dados. Para os cálculos dos desvios líquidos de potência, toma-se o menor desvio entre os desvios para as potências geradas ( $\alpha_{P_k}^{ger}$  e  $\alpha_{Q_k}^{ger}$ ) e para as potências consumidas ( $\alpha_{P_k}^{carga}$  e  $\alpha_{Q_k}^{carga}$ ).

Como exemplo, suponha que uma barra PV possui potência reativa gerada (e consequente-

mente  $\alpha_{Q_k}^{ger}$ ) e potência reativa consumida ( $\alpha_{Q_k}^{carga}$ ). Então o desvio líquido será o menor destes dois valores.

Caso uma barra não possua potência gerada, o desvio líquido é o próprio desvio da potência consumida, e vice-versa, como expresso em (A.8).

$$\begin{aligned}\alpha_{P_k}^{liq} &= \min(\alpha_{P_k}^{ger}, \alpha_{P_k}^{carga}) & \alpha_{P_k}^{liq} \neq 0 \\ \alpha_{Q_k}^{liq} &= \min(\alpha_{Q_k}^{ger}, \alpha_{Q_k}^{carga}) & \alpha_{Q_k}^{liq} \neq 0\end{aligned}\tag{A.8}$$

onde

- $\alpha_{P_k}^{liq}$  e  $\alpha_{Q_k}^{liq}$  - são respectivamente os desvios líquidos das potências ativa e reativa na barra k
- $\alpha_{P_k}^{ger}$  e  $\alpha_{Q_k}^{ger}$  - são respectivamente os desvios das potências ativa e reativa geradas na barra k
- $\alpha_{P_k}^{carga}$  e  $\alpha_{Q_k}^{carga}$  - são respectivamente os desvios das potências ativa e reativa consumidas na barra k

O desvio em uma barra é nulo se sua injeção líquida de potência é nula ou se a partir do banco de dados têm-se desvio nulo para as potências desta barra.

A multiplicação entre os desvios líquidos e a matriz Jacobiana obtida na última iteração, é baseada no princípio de que caso se tome a variação global de  $\Delta \underline{P}$  e  $\Delta \underline{Q}$ , desde a primeira à última iteração do FC Newton-Raphson convencional e multiplique-se esta variação pela Jacobiana, tem-se os desvios globais para  $\underline{V}$  e  $\underline{\theta}$ .

Considerando que os desvios para  $\underline{V}$  e  $\underline{\theta}$  são inicialmente nulos, os valores para  $\underline{\alpha}_{Pliqcalc}$  e  $\underline{\alpha}_{Qliqcalc}$  calculados na primeira iteração serão nulos. Caso fosse possível executar o processo iterativo totalmente na forma nebulosa, estes desvios iriam de zero aos valores de  $\underline{\alpha}_{Pliq}$  e  $\underline{\alpha}_{Qliq}$ .

Toma-se então os valores de  $\underline{\alpha}_{Pliq}$  e  $\underline{\alpha}_{Qliq}$  para calcular os desvios globais para  $\underline{\tilde{V}}$  e  $\underline{\tilde{\theta}}$ , obtendo então as variáveis na forma nebulosa.

$$\underline{\alpha}_{(\theta,V)} = [J_{final}]^{-1} \cdot \underline{\alpha}_{liqPQ} \quad (A.9)$$

onde

$[J_{final}]$  - matriz construída na última iteração do Fluxo de Carga Newton - Raphson

$\underline{\alpha}_{(\theta,V)}$  - vetor dos desvios dos ângulos e magnitudes das tensões nas barras

$\underline{\alpha}_{liqPQ}$  - vetor formado pelos desvios líquidos das potências ativa e reativa das barras

Obtidos os valores dos ângulos e das magnitudes das tensões nas barras na forma nebulosa, pode-se calcular os fluxos nos ramos, as perdas e as potências reativas geradas nas barras de referência e PV bem como a potência ativa gerada na barra de referência. Neste ponto teve-se que utilizar dois tipos de função de multiplicação (faixa larga e faixa estreita), devido à diferente quantidade de multiplicações presentes nas expressões utilizadas nos cálculos das variáveis.

Para o cálculo dos fluxos de potência na linhas de transmissão utiliza-se a função de faixa estreita, para restringir o valor de  $\alpha$  que tende a aumentar devido à grande quantidade de multiplicações nestas expressões. Para os fluxos nos transformadores, perdas na transmissão e potências geradas utiliza-se a função de faixa larga.

O cálculo dos fluxos de potência nos ramos é executado utilizando-se as mesmas estruturas das expressões do FCNR, onde se utiliza  $\underline{\tilde{V}}$  e  $\underline{\tilde{\theta}}$  na forma nebulosa. As operações são executadas utilizando os operadores nebulosos desenvolvidos para a função sinusoidal, como indicado nas equações (A.10).

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \underline{\otimes} g_{km} \ominus tap_{km} \underline{\otimes} \tilde{V}_k \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \underline{\otimes} \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{P}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \underline{\otimes} g_{km} \underline{\otimes} tap_{km}^2 \ominus \tilde{V}_k \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} tap_{km} \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \underline{\otimes} \sin(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{km} &= \tilde{V}_k^2 \underline{\otimes} (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \ominus tap_{km} \underline{\otimes} \tilde{V}_k \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \sin(\tilde{\theta}_{km}) \ominus b_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km})) \\
\tilde{Q}_{mk} &= \tilde{V}_m^2 \underline{\otimes} (b_{km} \oplus b_{km}^{sh}) \underline{\otimes} tap_{km}^2 \oplus \tilde{V}_k \underline{\otimes} \tilde{V}_m \underline{\otimes} tap_{km} \underline{\otimes} (g_{km} \underline{\otimes} \sin(\tilde{\theta}_{km}) \oplus b_{km} \underline{\otimes} \cos(\tilde{\theta}_{km}))
\end{aligned} \tag{A.10}$$

sendo

$\tilde{V}$  - magnitude da tensão na forma de um número nebuloso  $(m_v, \alpha_v)$ ;

$\underline{\otimes}$  - multiplicação *fuzzy*, faixa estreita, com exceção dos transformadores;

$\oplus$  e  $\ominus$  - subtração e soma nebulosas.

Para os cálculos da potência ativa gerada na barra de referência e das potências reativas geradas nas barras PV e de referência tem-se as seguintes expressões:

$$\begin{aligned}
\tilde{P}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \cos \tilde{\theta}_{km} \oplus B_{km} \otimes \sin \tilde{\theta}_{km}) \\
\tilde{Q}_k &= \tilde{V}_k \otimes \sum_{m \in K} \tilde{V}_m \otimes (G_{km} \otimes \sin \tilde{\theta}_{km} \ominus B_{km} \otimes \cos \tilde{\theta}_{km})
\end{aligned} \tag{A.11}$$

E para as perdas:

$$\tilde{P}_{Perdaskm} = g_{km} \otimes \tilde{V}_k^2 + g_{km} \otimes \tilde{V}_m^2 \otimes tap_{km}^2 - 2 \otimes tap_{km}^2 \otimes \tilde{V}_k \otimes \tilde{V}_m \otimes g_{km} \otimes \cos(\tilde{\theta}_{km}) \tag{A.12}$$

sendo

$\otimes$  - multiplicação *fuzzy* faixa larga.

## Apêndice B

### Banco de Dados

Neste apêndice consta o banco de dados do Sistema Real.

Tabela B.1: Dados de Barra - Sistema Real

1	3	FURNAS - 0	1009	0.	0.0	0.0	-999	999	0.0	0.0	0.0
2	0	TANQUIN- 9	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.2	0.0
3	0	TANQUIN- 7	1000	0.	0.0	0.0			2.7	2.3	0.0
4	0	RHODIA - 58	1000	0.	0.0	0.0			28.6	5.1	0.0
5	0	RHO-FIC- 65	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
6	0	RHO-FIC- 64	1000	0.	0.1	0.0			0.0	0.0	0.0
7	0	OX. BRA- 68	1000	0.	0.0	0.0			7.2	2.6	0.0
8	0	OXB-FIC- 73	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
9	0	OXB-FIC- 72	1000	0.	0.1	0.0			0.0	0.0	0.0
10	0	REPLAN - 76	1000	0.	0.0	0.0			8.2	2.5	0.0
11	0	REP-FIC- 85	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
12	0	REP-FIC- 84	1000	0.	0.1	0.0			0.0	0.0	0.0
13	0	PAULINI- 939	1000	0.	0.0	0.0			16.0	3.3	0.0
14	0	PAU-FIC- 93	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
15	0	PAU-FIC- 92	1000	0.	0.1	0.0			0.0	0.0	0.0
16	0	ALPARGA- 96	1000	0.	0.0	15.7			15.2	0.0	0.0
17	0	TAT-FIC- 101	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
18	0	TAT-FIC- 100	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
19	0	POLIENK- 104	1000	0.	0.0	0.0			12.0	3.7	0.0
20	0	POL-FIC- 111	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
21	0	POL-FIC- 110	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
22	0	GOODYEA- 114	1000	0.	0.0	0.0			17.6	6.9	0.0
23	0	FICAP - 118	1000	0.	0.0	0.0			3.5	22.7	0.0
24	0	FCP-FIC- 125	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
25	0	FCP-FIC- 124	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0

26	0	GOY-FIC- 129	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
27	0	GOY-FIC- 128	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
28	0	TAQUARA- 132	1000	0.	0.0	0.0		24.5	7.3	0.0
29	0	B. GERA- 139	1000	0.	0.0	0.5		15.2	0.0	0.0
30	0	BGE-FIC- 145	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
31	0	BGE-FIC- 144	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
32	0	FEPASA - 152	1000	0.	0.0	0.5		0.6	0.0	0.0
33	0	FEP-FIC- 157	1000	0.	0.0	0.0		0.1	0.0	0.0
34	0	FEP-FIC- 156	1000	0.	0.1	0.1		0.0	0.0	0.0
35	0	MORUMBI- 160	1000	0.	0.0	0.0		13.4	2.2	0.0
36	0	MBI-FIC- 165	1000	0.	0.0	0.0		0.2	0.1	0.0
37	0	MBI-FIC- 164	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.0	0.0
38	0	MERC. B- 239	1000	0.	0.0	0.0		2.8	0.7	0.0
39	0	DIC-FIC- 246	1000	0.	0.0	0.0		0.2	0.1	0.0
40	0	DIC-FIC- 245	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
41	0	MBZ-FIC- 252	1000	0.	0.0	0.0		0.2	0.1	0.0
42	0	MBZ-FIC- 251	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
43	0	BANDEIR- 255	1000	0.	0.0	0.0		10.3	2.5	0.0
44	0	QUILOMB- 307	1000	0.	0.0	0.0		12.3	5.5	0.0
45	0	GEVISA - 311	1000	0.	0.0	0.0		1.4	1.5	0.0
46	0	CHAPADA- 317	1000	0.	0.0	0.0		13.2	5.0	0.0
47	0	QLB-FIC- 323	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
48	0	QLB-FIC- 322	1000	0.	0.2	0.1		0.0	0.0	0.0
49	0	GEV-FIC- 327	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
50	0	GEV-FIC- 326	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
51	0	BOA VIS- 330	1000	0.	0.0	0.0		13.8	1.3	0.0
52	0	CDJ-FIC- 339	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
53	0	CDJ-FIC- 338	1000	0.	0.0	0.0		0.3	0.2	0.0
54	0	CPD-FIC- 346	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
55	0	CPD-FIC- 345	1000	0.	0.0	0.0		0.1	0.0	0.0
56	0	COBRASM- 354	1000	0.	0.0	0.0		1.8	1.3	0.0
57	0	BEMAF - 358	1000	0.	0.0	0.0		0.7	0.8	0.0
58	0	PIRELLI- 362	1000	0.	0.0	0.0		9.8	4.1	0.0
59	0	CMA-FIC- 367	1000	0.	0.6	0.0		0.0	0.2	0.0
60	0	CMA-FIC- 366	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
61	0	BMF-FIC- 371	1000	0.	0.5	0.0		0.0	0.2	0.0
62	0	BMF-FIC- 370	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
63	0	MORRO A- 374	1000	0.	0.0	0.0		14.1	2.1	0.0
64	0	MAZ-FIC- 380	1000	0.	0.4	0.0		0.0	0.2	0.0
65	0	MAZ-FIC- 379	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
66	0	MONTE M- 383	1000	0.	0.0	0.0		18.6	8.2	0.0
67	0	VID SMA- 387	1000	0.	0.0	0.0		3.3	1.0	0.0
68	0	VSM-FIC- 390	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
69	0	RIO PED- 392	1000	0.	0.0	0.0		4.3	3.7	0.0
70	0	CAPIVAR- 396	1000	0.	0.0	0.0		13.7	6.0	0.0
71	0	BAN-FIC- 429	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
72	0	BAN-FIC- 430	1000	0.	0.0	0.0		0.1	0.1	0.0
73	0	PRL-FIC- 433	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
74	0	PRL-FIC- 434	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.2	0.0
75	0	CARIOBA- 501	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
76	0	C. VERD- 552	1000	0.	0.0	0.0		14.2	5.2	0.0
77	0	TAP CVE- 561	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
78	0	S. BARB- 563	1000	0.	0.0	0.0		8.3	4.4	0.0
79	0	TAP SBA- 566	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
80	0	TAP MBE- 568	1000	0.	0.0	0.2		0.0	0.0	0.0



81	0	TOYOBO - 570	1000	0.	0.0	0.0		5.8	1.9	0.0
82	0	TOY-FIC- 574	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
83	0	TOY-FIC- 575	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
84	0	IPE - 578	1000	0.	0.0	0.0		19.5	8.9	0.0
85	0	FAZ. VE- 585	1000	0.	0.0	0.0		12.7	5.1	0.0
86	0	N. ODES- 589	1000	0.	0.0	0.0		15.6	4.4	0.0
87	0	AME-FIC- 601	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0
88	0	AME-FIC- 602	1000	0.	0.0	0.1		0.1	0.0	0.0
89	0	SUMARE - 590	1000	0.	0.0	0.0		15.0	6.5	0.0
90	0	IPE-FIC- 676	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
91	0	IPE-FIC- 677	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
92	0	ELETROM- 591	1000	0.	0.0	0.0		21.3	3.9	0.0
93	0	AMERICA- 595	1000	0.	0.0	0.0		11.5	3.4	0.0
94	0	FZV-FIC- 605	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0
95	0	FZV-FIC- 606	1000	0.	0.0	0.1		0.1	0.0	0.0
96	0	NOD-FIC- 609	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0
97	0	NOD-FIC- 610	1000	0.	0.0	0.1		0.1	0.0	0.0
98	0	CILLOS - 613	1000	0.	0.0	0.0		9.3	1.8	0.0
99	0	CIL-FIC- 618	1000 70.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0	
100	0	CIL-FIC- 619	1000	0.	0.0	0.1		0.1	0.0	0.0
101	0	ESMERAL- 625	1000	0.	0.0	0.0		24.4	11.6	0.0
102	0	ESM-FIC- 627	1000	0.	0.0	0.0		0.1	0.2	0.0
103	0	ESM-FIC- 628	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
104	0	FIBRA I- 631	1000	0.	0.7	0.0		0.0	3.2	0.0
105	0	FIBRA - 636	1000	0.	0.0	0.0		24.1	5.2	0.0
106	0	FBR-FIC- 644	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
107	0	FIB-FIC- 645	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.2	0.0
108	0	JARDIM - 647	1000	0.	0.0	0.0		12.2	4.8	0.0
109	0	JAR-FIC- 652	1000	0.	0.0	0.0		0.1	0.1	0.0
110	0	JAR-FIC- 653	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0
111	0	PIRELLI- 656	1000	0.	0.3	7.1		0.0	0.0	0.0
112	0	PIL-FIC- 662	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
113	0	PIL-FIC- 663	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
114	0	ELE-FIC- 669	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
115	0	ELE-FIC- 670	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
116	0	PIRACIC- 709	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
117	0	PIRACIC- 704	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
118	0	BEI-FIC- 725	1000	0.	0.0	0.2		0.0	0.0	0.0
119	0	DEDINI - 726	1000	0.	0.0	0.0		51.3	11.2	0.0
120	0	DED-FIC- 731	1000	0.	0.0	0.1		0.0	0.0	0.0
121	0	W. MART- 733	1000	0.	19.2	0.0		0.0	2.6	0.0
122	0	WMA-FIC- 737	1000	0.	0.0	0.1		0.0	0.0	0.0
123	0	WMA-FIC- 738	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
124	0	C. PINT- 741	1000	0.	0.0	0.0		12.0	11.9	0.0
125	0	NAZARE - 744	1000	0.	0.0	0.0		13.3	6.9	0.0
126	0	TAP PIR- 746	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
127	0	TREVO - 805	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
128	0	FIGUEIR- 841	1000	0.	0.0	0.0		4.5	4.2	0.0
129	0	FIG-FIC- 844	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.1	0.0
130	0	COSMOPO- 859	1000	0.	0.0	0.0		11.2	4.5	0.0
131	0	TAP UAM- 862	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
132	0	MMM-FIC- 883	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
133	0	MMM-FIC- 884	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
134	0	SOUZAS - 887	1000	0.	0.0	0.0		9.0	5.4	0.0
135	0	ITATIBA- 893	1000	0.	0.0	0.4		3.9	0.0	0.0

136	0	AMR-FIC- 904	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
137	0	SUM-FIC- 909	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
138	0	SUM-FIC- 910	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
139	0	TAP CQD- 816	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
140	0	CHARQUE- 681	1000	0.	0.0	0.0		1.0	2.5	0.0
141	0	TAP CVE- 557	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
142	0	DIC - 261	1000	0.	0.0	0.0		15.1	0.8	0.0
143	0	HORTOLA- 835	1000	0.	0.0	0.0		11.8	4.6	0.0
144	0	FEV-FIC- 431	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
145	0	FEPASA - 920	1000	0.	0.0	0.0		1.3	0.2	0.0
146	0	JD. MAR- 918	1000	0.	0.0	0.0		9.9	5.6	0.0
147	0	JDM-FIC- 439	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
148	0	JDM-FIC- 921	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.2	0.0
149	0	VOTORAN- 453	1000	0.	0.0	0.0		11.6	3.5	0.0
150	0	YVO-FIC- 455	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
151	0	YVO-FIC- 462	1000	0.	0.0	0.0		0.2	0.0	0.0
152	0	CATERPI- 833	1000	0.	0.0	0.0		12.3	5.5	0.0
153	0	CTP-FIC- 464	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
154	0	CTP-FIC- 463	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
155	0	BARBARE- 467	1000	0.	0.0	0.0		13.8	3.1	0.0
156	0	BAB-FIC- 474	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.0	0.0
157	0	BAB-FIC- 473	1000	4.	0.6	0.1		0.0	0.0	0.0
158	0	UNILEST- 484	1000	0.	0.0	0.0		16.5	11.8	0.0
159	0	UNE-FIC- 477	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0
160	0	UNE-FIC- 710	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
161	0	PIRACIC- 485	1000	0.	0.0	0.0		16.1	6.9	0.0
162	0	PMI-FIC- 490	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0
163	0	PMI-FIC- 488	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
164	0	ST.CECI- 432	1000	0.	0.0	0.0		12.0	4.4	0.0
165	0	SCE-FIC- 929	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.1	0.0
166	0	SCE-FIC- 930	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
167	0	BOS-FIC- 897	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
168	0	BOSCH - 336	1000	0.	0.0	0.0		11.0	3.8	0.0
169	0	BOTUCAT- 745	1000	0.	6.5	6.3		0.0	0.0	0.0
170	0	TAN-FIC- 845	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.1	0.0
171	0	AND-FIC- 980	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
172	0	ANDORIN- 978	1000	0.	0.0	0.0		11.8	5.7	0.0
173	0	ANDORIN- 977	1000	0.	0.0	0.0		6.7	4.6	0.0
174	0	SAC-FIC- 168	1000	0.	0.0	0.0		0.1	0.1	0.0
175	0	SAC-FIC- 173	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
176	0	CLK-FIC- 170	1000	0.	0.0	0.0		0.1	0.1	0.0
177	0	CLK-FIC- 193	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
178	0	SACI - 198	1000	0.	0.0	0.0		10.5	2.5	0.0
179	0	CLARK - 197	1000	0.	0.0	0.0		12.1	4.0	0.0
180	0	COLONIA- 857	1000	0.	0.0	0.0		16.2	4.7	0.0
181	0	CRUZEIR- 175	1000	0.	0.0	0.0		13.4	0.4	0.0
182	0	VALINHO- 675	1000	0.	0.0	0.0		15.8	6.7	0.0
183	0	GESSY - 204	1000	0.	0.0	0.0		8.9	3.4	0.0
184	0	NDA-FIC- 205	1000	0.	0.3	0.0		0.0	0.1	0.0
185	0	NDA-FIC- 189	1000	0.	0.1	0.0		0.0	0.2	0.0
186	0	NOTRE D- 210	1000	0.	0.0	0.0		9.2	0.1	0.0
187	0	N. VENE- 187	1000	0.	0.0	0.0		9.3	0.4	0.0
188	0	NVE-FIC- 993	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
189	0	NVE-FIC- 992	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0
190	0	TAP UVA- 962	1000	0.	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0

191	0	TAP BRO- 963	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
192	0	BROTAS - 985	1000	0.	0.0	0.0			1.0	1.8	0.0
193	0	MONTEDE- 967	1000	0.	0.0	0.0			10.9	4.9	0.0
194	0	MDE-FIC-1045	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
195	0	MDE-FIC-1044	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.0	0.0
196	0	C. JARD- 837	1000	0.	0.0	0.0			18.4	7.1	0.0
197	0	CAMPINA- 417	1000	0.	0.0	0.0			62.5	24.0	0.0
198	0	CARIOBA- 496	1000	0.	0.0	0.0			0.4	0.0	0.0
199	0	CARIOBA- 499	1000	0.	28.3	0.0			0.0	4.1	0.0
200	0	CESP SB- 771	1000	0.	534.0	55.4			0.0	0.0	0.0
201	0	CESP SU- 748	1000	0.	162.7	62.0			0.0	0.0	0.0
202	0	NAPAREC- 264	1000	0.	0.0	0.0			0.3	0.0	0.0
203	0	PAINEIR- 400	1000	0.	0.0	0.0			10.6	5.2	0.0
204	0	PIRACIC- 714	1000	0.	0.0	0.0			14.9	5.4	30.0
205	0	SALTINH- 398	1000	0.	0.0	0.0			3.2	1.7	0.0
206	0	TANQUIN- 5	1000	0.	0.0	0.0			0.0	0.2	0.0
207	0	TRES M - 895	1000	0.	0.0	0.0			9.0	1.6	0.0
208	0	TREVO - 800	1000	0.	0.0	0.0			28.1	2.1	0.0
209	0	TREVO - 803	1000	0.	0.0	0.6			0.4	0.0	0.0
210	0	UAMERIC- 864	1000	0.	0.3	0.0			0.0	0.8	0.0
211	0	VIRACOP- 211	1000	0.	0.0	0.0			14.1	3.5	0.0
212	2	COSTPIN-fict	1003	0.	0.0	0.0	-999	999	0.0	0.0	0.0
213	2	BOTUCAT-fict	1004	0.	0.0	0.0	-999	999	0.0	0.0	0.0
214	2	CAMPINA-fict	1021	0.	0.0	0.0	-999	999	0.0	0.0	0.0
215	2	SUMARE-fict	1028	0.	0.0	0.0	-999	999	0.0	0.0	0.0
216	2	SBARBAR-fict	1026	0.	0.0	0.0	-999	999	0.0	0.0	0.0

Tabela B.2: Dados de Linha - Sistema Real

1	206	0.009	0.043	0.011	0.000	0.000	0.000
1	206	0.009	0.043	0.011	0.000	0.000	0.000
1	206	0.009	0.043	0.011	0.000	0.000	0.000
206	5	1.155	2.854	0.765	0.000	0.000	0.000
206	6	1.155	2.854	0.765	0.000	0.000	0.000
206	203	0.822	3.886	1.415	0.000	0.000	0.000
206	203	0.822	3.886	1.415	0.000	0.000	0.000
3	134	7.540	17.293	0.255	0.000	0.000	0.000
3	170	8.030	22.410	0.360	0.000	0.000	0.000
206	184	1.390	3.440	0.920	0.000	0.000	0.000
206	185	1.390	3.440	0.920	0.000	0.000	0.000
206	34	1.388	3.434	0.918	0.000	0.000	0.000
206	33	1.388	3.434	0.918	0.000	0.000	0.000
206	194	0.666	1.648	0.441	0.000	0.000	0.000
206	195	0.666	1.648	0.441	0.000	0.000	0.000
3	2	0.000	-1.197	0.000	1.010	0.900	1.100
206	2	0.000	24.517	0.000	1.000	0.000	0.000
4	5	0.076	0.188	0.050	0.000	0.000	0.000
5	8	0.021	0.052	0.014	0.000	0.000	0.000
6	9	0.021	0.052	0.014	0.000	0.000	0.000
7	8	0.002	0.006	0.002	0.000	0.000	0.000
8	11	0.327	0.809	0.216	0.000	0.000	0.000
9	12	0.327	0.809	0.216	0.000	0.000	0.000
10	11	0.282	0.698	0.187	0.000	0.000	0.000
11	14	0.254	0.628	0.168	0.000	0.000	0.000
12	15	0.254	0.628	0.168	0.000	0.000	0.000
13	14	0.134	0.332	0.083	0.000	0.000	0.000
14	17	1.602	3.965	1.060	0.000	0.000	0.000
15	18	1.602	3.965	1.060	0.000	0.000	0.000
16	18	0.009	0.022	0.006	0.000	0.000	0.000
17	20	0.036	0.088	0.024	0.000	0.000	0.000
18	21	0.036	0.088	0.024	0.000	0.000	0.000
19	21	0.011	0.026	0.007	0.000	0.000	0.000
20	26	0.073	0.182	0.049	0.000	0.000	0.000
21	27	0.073	0.182	0.049	0.000	0.000	0.000
22	24	0.037	0.091	0.024	0.000	0.000	0.000
23	25	0.004	0.010	0.003	0.000	0.000	0.000
24	26	0.121	0.298	0.080	0.000	0.000	0.000
25	27	0.121	0.298	0.080	0.000	0.000	0.000
26	198	0.439	1.092	0.289	0.000	0.000	0.000
27	198	0.432	1.073	0.285	0.000	0.000	0.000
28	31	0.378	0.935	0.250	0.000	0.000	0.000
29	30	0.109	0.269	0.072	0.000	0.000	0.000
30	195	0.199	0.493	0.132	0.000	0.000	0.000
31	194	0.199	0.493	0.132	0.000	0.000	0.000

---

32	34	0.039	0.097	0.026	0.000	0.000	0.000
33	36	0.124	0.306	0.082	0.000	0.000	0.000
34	37	0.124	0.306	0.082	0.000	0.000	0.000
35	37	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
36	202	0.824	2.039	0.545	0.000	0.000	0.000
37	202	0.824	2.039	0.545	0.000	0.000	0.000
211	208	0.714	1.767	0.473	0.000	0.000	0.000
211	208	0.714	1.767	0.473	0.000	0.000	0.000
211	41	0.131	0.325	0.087	0.000	0.000	0.000
211	42	0.131	0.325	0.087	0.000	0.000	0.000
211	174	0.740	1.820	0.490	0.000	0.000	0.000
211	175	0.740	1.820	0.490	0.000	0.000	0.000
197	203	0.168	0.911	0.241	0.000	0.000	0.000
197	203	0.168	0.911	0.241	0.000	0.000	0.000
38	40	0.108	0.259	0.072	0.000	0.000	0.000
39	41	0.254	0.629	0.168	0.000	0.000	0.000
40	42	0.254	0.629	0.168	0.000	0.000	0.000
39	142	0.016	0.039	0.010	0.000	0.000	0.000
41	72	0.249	0.618	0.165	0.000	0.000	0.000
42	71	0.249	0.618	0.165	0.000	0.000	0.000
43	72	0.160	0.397	0.106	0.000	0.000	0.000
202	143	0.390	2.130	0.610	0.000	0.000	0.000
202	201	0.447	2.435	0.732	0.000	0.000	0.000
202	201	0.447	2.435	0.732	0.000	0.000	0.000
202	59	0.234	0.579	0.155	0.000	0.000	0.000
202	60	0.234	0.579	0.155	0.000	0.000	0.000
202	48	0.233	0.798	0.231	0.000	0.000	0.000
202	47	0.233	0.798	0.231	0.000	0.000	0.000
202	113	0.363	1.124	0.320	0.000	0.000	0.000
202	112	0.363	1.124	0.320	0.000	0.000	0.000
202	96	0.753	3.979	1.196	0.000	0.000	0.000
202	97	0.753	3.979	1.196	0.000	0.000	0.000
44	47	0.009	0.022	0.006	0.000	0.000	0.000
45	50	0.023	0.064	0.018	0.000	0.000	0.000
46	55	0.427	1.058	0.283	0.000	0.000	0.000
47	49	0.435	1.069	0.289	0.000	0.000	0.000
48	50	0.435	1.069	0.289	0.000	0.000	0.000
49	54	0.170	0.418	0.113	0.000	0.000	0.000
50	55	0.170	0.418	0.113	0.000	0.000	0.000
51	54	0.102	0.250	0.068	0.000	0.000	0.000
51	52	0.400	0.983	0.266	0.000	0.000	0.000
51	167	0.077	0.200	0.048	0.000	0.000	0.000
52	208	0.356	0.874	0.236	0.000	0.000	0.000
53	55	0.479	1.177	0.318	0.000	0.000	0.000
53	208	0.356	0.874	0.236	0.000	0.000	0.000
52	196	0.005	0.025	0.008	0.000	0.000	0.000
56	60	0.062	0.156	0.041	0.000	0.000	0.000
57	62	0.003	0.008	0.002	0.000	0.000	0.000

---

58	74	0.040 0.099 0.026 0.000 0.000 0.000
59	61	0.155 0.383 0.102 0.000 0.000 0.000
60	62	0.155 0.383 0.102 0.000 0.000 0.000
62	65	0.174 0.430 0.115 0.000 0.000 0.000
61	64	0.174 0.430 0.115 0.000 0.000 0.000
63	64	0.009 0.021 0.006 0.000 0.000 0.000
64	74	0.737 1.820 0.488 0.000 0.000 0.000
65	73	0.737 1.820 0.488 0.000 0.000 0.000
66	201	0.710 2.518 0.658 0.000 0.000 0.000
66	68	1.315 4.647 1.224 0.000 0.000 0.000
67	68	0.272 0.956 0.255 0.000 0.000 0.000
68	70	0.562 2.011 0.518 0.000 0.000 0.000
69	70	1.502 5.331 1.392 0.000 0.000 0.000
69	205	0.716 2.535 0.665 0.000 0.000 0.000
205	162	0.635 2.164 0.613 0.000 0.000 0.000
205	163	0.635 2.164 0.613 0.000 0.000 0.000
203	171	0.192 0.994 0.287 0.000 0.000 0.000
72	148	0.287 0.711 0.190 0.000 0.000 0.000
71	147	0.287 0.711 0.190 0.000 0.000 0.000
74	148	0.048 0.118 0.032 0.000 0.000 0.000
73	147	0.048 0.118 0.032 0.000 0.000 0.000
198	82	0.131 0.323 0.087 0.000 0.000 0.000
198	83	0.131 0.323 0.087 0.000 0.000 0.000
198	107	0.010 0.025 0.007 0.000 0.000 0.000
198	110	0.245 0.606 0.162 0.000 0.000 0.000
198	106	0.091 0.226 0.060 0.000 0.000 0.000
199	79	6.670 9.537 0.149 0.000 0.000 0.000
198	200	0.393 2.117 0.652 0.000 0.000 0.000
198	200	0.393 2.117 0.652 0.000 0.000 0.000
199	141	1.630 4.040 0.070 0.000 0.000 0.000
198	75	0.000 21.777 0.000 1.000 0.000 0.000
199	75	0.000 0.063 0.000 0.987 0.900 1.100
76	141	0.002 0.003 0.001 0.000 0.000 0.000
77	210	2.303 5.266 0.103 0.000 0.000 0.000
77	141	0.002 0.003 0.001 0.000 0.000 0.000
78	79	0.001 0.002 0.001 0.000 0.000 0.000
79	80	14.348 18.266 0.300 0.000 0.000 0.000
80	118	6.709 8.986 0.144 0.000 0.000 0.000
81	82	0.020 0.049 0.013 0.000 0.000 0.000
82	90	0.554 1.362 0.368 0.000 0.000 0.000
83	91	0.554 1.362 0.368 0.000 0.000 0.000
84	91	0.007 0.017 0.005 0.000 0.000 0.000
85	94	0.049 0.124 0.032 0.000 0.000 0.000
86	87	0.332 0.831 0.217 0.000 0.000 0.000
87	93	0.175 0.447 0.112 0.000 0.000 0.000
87	94	0.355 0.888 0.232 0.000 0.000 0.000
88	95	0.355 0.888 0.232 0.000 0.000 0.000
89	138	0.518 1.281 0.343 0.000 0.000 0.000

---

90	136	0.038	0.094	0.026	0.000	0.000	0.000
91	138	0.955	2.246	0.635	0.000	0.000	0.000
92	114	0.003	0.009	0.002	0.000	0.000	0.000
94	96	0.049	0.124	0.032	0.000	0.000	0.000
95	97	0.049	0.124	0.032	0.000	0.000	0.000
96	99	0.177	0.964	0.290	0.000	0.000	0.000
97	100	0.177	0.964	0.290	0.000	0.000	0.000
98	100	0.080	0.431	0.133	0.000	0.000	0.000
99	102	0.163	0.891	0.268	0.000	0.000	0.000
100	103	0.163	0.891	0.268	0.000	0.000	0.000
101	103	0.049	0.120	0.032	0.000	0.000	0.000
102	200	0.221	1.207	0.363	0.000	0.000	0.000
103	200	0.221	1.207	0.363	0.000	0.000	0.000
104	106	0.113	0.289	0.073	0.000	0.000	0.000
105	106	0.004	0.011	0.059	0.000	0.000	0.000
107	109	0.235	0.581	0.155	0.000	0.000	0.000
108	110	0.290	0.717	0.192	0.000	0.000	0.000
109	200	0.613	1.516	0.405	0.000	0.000	0.000
110	200	0.613	1.516	0.405	0.000	0.000	0.000
111	112	0.010	0.026	0.007	0.000	0.000	0.000
112	114	0.217	0.532	0.144	0.000	0.000	0.000
113	115	0.217	0.532	0.144	0.000	0.000	0.000
114	188	0.052	0.127	0.035	0.000	0.000	0.000
115	189	0.052	0.127	0.035	0.000	0.000	0.000
204	200	2.772	6.860	1.835	0.000	0.000	0.000
204	200	2.772	6.860	1.835	0.000	0.000	0.000
204	123	0.140	0.363	0.088	0.000	0.000	0.000
204	120	0.007	0.018	0.004	0.000	0.000	0.000
204	119	0.058	0.210	0.052	0.000	0.000	0.000
116	118	1.104	1.558	0.024	0.000	0.000	0.000
116	126	6.407	9.007	0.120	0.000	0.000	0.000
204	150	0.588	1.456	0.389	0.000	0.000	0.000
204	151	0.588	1.456	0.389	0.000	0.000	0.000
204	117	0.000	22.929	0.000	1.000	0.900	1.100
116	117	0.000	0.07	0.000	1.012	0.900	1.100
120	122	0.134	0.348	0.084	0.000	0.000	0.000
121	123	0.157	0.389	0.104	0.000	0.000	0.000
122	125	1.321	3.891	1.023	0.000	0.000	0.000
123	124	0.545	1.417	0.343	0.000	0.000	0.000
125	169	9.573	25.577	6.219	0.000	0.000	0.000
126	139	11.906	17.024	0.242	0.000	0.000	0.000
201	143	0.420	2.330	0.670	0.000	0.000	0.000
200	157	0.251	0.857	0.243	0.000	0.000	0.000
200	156	0.251	0.857	0.243	0.000	0.000	0.000
209	132	11.509	19.297	0.279	0.000	0.000	0.000
209	129	0.637	3.311	0.060	0.000	0.000	0.000
208	171	0.320	1.666	0.481	0.000	0.000	0.000
208	127	0.000	25.226	0.000	1.000	0.900	1.100

---

209	127	0.000 -0.946 0.000 1.012 0.900 1.100
207	132	0.001 0.002 0.001 0.000 0.000 0.000
128	129	3.779 4.855 0.062 0.000 0.000 0.000
129	170	0.643 3.341 0.061 0.000 0.000 0.000
130	131	6.000 9.032 0.123 0.000 0.000 0.000
131	210	6.410 9.650 0.131 0.000 0.000 0.000
210	132	13.806 19.190 0.270 0.000 0.000 0.000
210	133	13.806 19.190 0.270 0.000 0.000 0.000
134	135	18.024 23.107 0.302 0.000 0.000 0.000
136	137	0.917 2.252 0.609 0.000 0.000 0.000
137	188	0.257 0.632 0.171 0.000 0.000 0.000
138	189	0.257 0.632 0.171 0.000 0.000 0.000
139	140	0.002 0.003 0.001 0.000 0.000 0.000
139	190	21.442 35.328 0.504 0.000 0.000 0.000
144	145	1.040 2.651 0.667 0.000 0.000 0.000
144	147	0.101 0.257 0.065 0.000 0.000 0.000
146	148	0.242 0.607 0.159 0.000 0.000 0.000
149	150	0.005 0.013 0.003 0.000 0.000 0.000
150	153	0.396 0.981 0.262 0.000 0.000 0.000
151	154	0.396 0.981 0.262 0.000 0.000 0.000
152	154	0.203 0.503 0.134 0.000 0.000 0.000
153	159	0.274 0.677 0.181 0.000 0.000 0.000
154	157	1.106 3.753 1.062 0.000 0.000 0.000
155	156	0.172 0.426 0.114 0.000 0.000 0.000
156	160	1.345 4.347 1.221 0.000 0.000 0.000
158	160	0.064 0.159 0.042 0.000 0.000 0.000
159	165	0.256 0.634 0.169 0.000 0.000 0.000
160	166	0.256 0.634 0.169 0.000 0.000 0.000
161	163	0.191 0.473 0.126 0.000 0.000 0.000
162	165	0.236 0.583 0.156 0.000 0.000 0.000
163	166	0.236 0.583 0.156 0.000 0.000 0.000
164	166	0.302 0.747 0.200 0.000 0.000 0.000
167	168	0.007 0.020 0.005 0.000 0.000 0.000
170	173	0.008 0.043 0.001 0.000 0.000 0.000
171	172	0.002 0.011 0.003 0.000 0.000 0.000
174	182	1.550 3.890 1.020 0.000 0.000 0.000
174	176	0.252 0.625 0.167 0.000 0.000 0.000
175	180	3.140 8.100 2.000 0.000 0.000 0.000
175	177	0.252 0.625 0.167 0.000 0.000 0.000
176	178	0.006 0.014 0.004 0.000 0.000 0.000
177	179	0.025 0.061 0.016 0.000 0.000 0.000
180	181	0.740 1.950 0.450 0.000 0.000 0.000
181	185	2.110 5.220 1.390 0.000 0.000 0.000
182	183	0.101 0.258 0.061 0.000 0.000 0.000
182	184	1.200 3.000 0.780 0.000 0.000 0.000
184	186	0.077 0.190 0.051 0.000 0.000 0.000
187	189	0.187 0.494 0.115 0.000 0.000 0.000
190	191	9.120 12.457 0.190 0.000 0.000 0.000



---

191	192	7.265 6.260 0.075 0.000 0.000 0.000
193	195	0.007 0.018 0.005 0.000 0.000 0.000
169	1	0.000 67.750 0.000
169	200	0.000 26.310 0.000
1	201	0.000 55.100 0.000
1	200	0.000 12.900 0.000
201	200	0.000 12.520 0.000
124	212	0.000 50.420 0.000
169	213	0.000 7.170 0.000
1	214	0.000 3.660 0.000
201	215	0.000 9.400 0.000
200	216	0.000 2.090 0.000

---

## Apêndice C

# Divulgação da Pesquisa

Durante a realização desta pesquisa foram elaborados, submetidos e aceitos os seguintes artigos:

- CANOAS, A. C. G. ; MURARI, C. A. F. . Aplicação de Lógica Nebulosa na Análise de Redes de Energia Elétrica, *III Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência*, 2003, Campinas;
- CANOAS, A. C. G. ; MURARI, C. A. F. . Aplicação de Lógica Nebulosa na Análise de Redes de Energia Elétrica Utilizando Variáveis Lingüística, *XV Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2004, Gramado, RS;
- CANOAS, A. C. G. ; SILVA JUNIOR, I. J. ; MURARI, C. A. F. ; GRILO, A. P. . Um método computacional para a tradução bidirecional de valores numéricos em variáveis lingüísticas em centros de controle de sistemas de energia elétrica, *XI ERIAC - Encontro Regional Iberoamericano da Cigré*, 2005, Ciudad del Este;
- GRILO, A. P. ; MURARI, C. A. F. ; CANOAS, A. C. G. . Um método computacional para a seleção de contingências em sistemas de transmissão de energia elétrica em tempo real, : *XI ERIAC - Encontro Regional Iberoamericano do Cigré*, 2005, Ciudad del Este;

- CANOAS, A. C. G. ; MURARI, C. A. F. . Uma Metodologia para Controle de Tensão e de Potência Reativa Utilizando Regras Nebulosas, *VI Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência*, 2006, Campinas;
- CANOAS, A. C. G. ; MURARI, C. A. F. . Uma Metodologia para Controle de Tensão e de Potência Reativa Utilizando Regras Nebulosas, *XVI Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2006, Salvador, BA;
- CANOAS, A. C. G. ; MURARI, C. A. F. . Uma Estratégia para Monitorar o Perfil de Tensão via Lógica Nebulosa e Algoritmo Particle Swarm, *VII Encontro de Pesquisadores em Sistemas de Potência, 2007, Campinas*;
- CANOAS, A. C. G. ; MURARI, C. A. F. . Um Método Baseado em Regras Nebulosas para Satisfazer Requisitos de Qualidade de Redes de Energia Elétrica sob a Óptica do Perfil de Tensão, *VII Conferência Sobre Qualidade de Energia*, 2007, Santos.